

Estela Luna Jordán

Suelos de un humedal salino y fluctuante: la Laguna de Gallocanta

Departamento
Geografía y Ordenación del Territorio

Director/es
Castañeda del Álamo, Carmen

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

SUELOS DE UN HUMEDAL SALINO Y FLUCTUANTE: LA LAGUNA DE GALLOCANTA

Autor

Estela Luna Jordán

Director/es

Castañeda del Álamo, Carmen

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Geografía y Ordenación del Territorio

2017

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguan <http://zaguan.unizar.es>

Tesis Doctoral

Suelos de un humedal salino y fluctuante: La Laguna de Gallocanta

Autor

Estela Luna Jordán

Director/es

Carmen Castañeda del Álamo

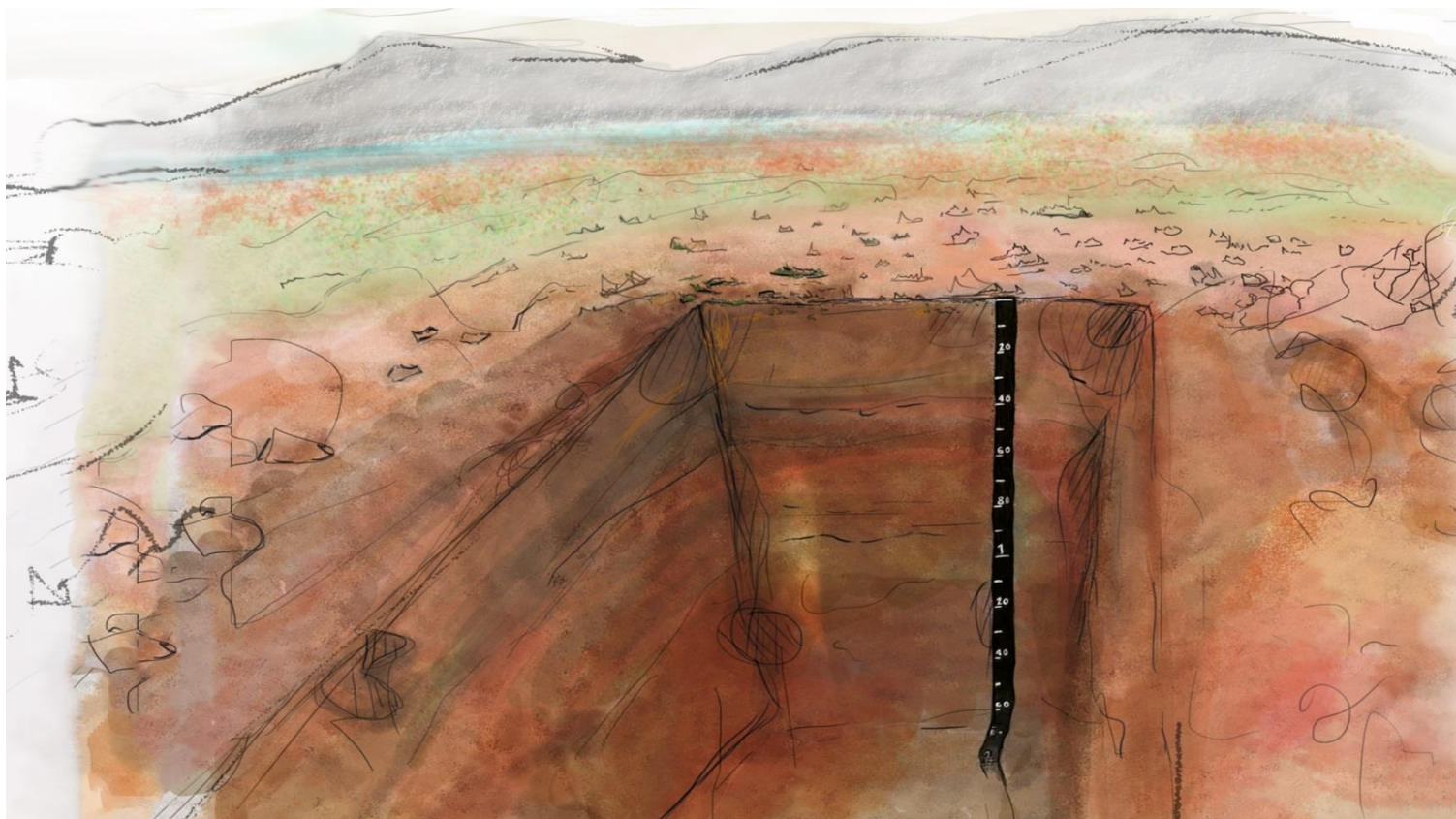
Universidad de Zaragoza
Geografía y Ordenación del Territorio
2017

Tesis Doctoral

Estación Experimental de Aula Dei (EEAD - CSIC)



Suelos de un humedal salino y fluctuante: La Laguna de Gallocanta



Universidad
Zaragoza

ESTELA LUNA JORDÁN

Directora: Dra. Carmen Castañeda del Álamo

Zaragoza, Marzo 2017

Estación Experimental de Aula Dei (EEAD - CSIC)
Universidad de Zaragoza



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Suelos de un humedal salino y fluctuante:

La Laguna de Gallocanta

Tesis doctoral presentada por Estela Luna Jordán dentro del Programa de Doctorado de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente perteneciente al Departamento de Geografía y Ordenación del territorio la Universidad de Zaragoza para optar al Grado de Doctora.

ESTELA LUNA JORDÁN

Directora: Dra. Carmen Castañeda del Álamo
CSIC - Estación Experimental de Aula Dei (EEAD)
Zaragoza (España), a 15 de Marzo de 2017

Dña. Carmen Castañeda del Álamo, investigadora del Departamento "Suelo y Agua" de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Zaragoza, España,

INFORMA

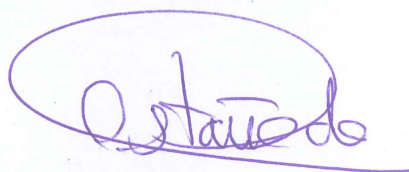
Que Dña. Estela Luna Jordán ha realizado bajo mi dirección la Tesis Doctoral que presenta con el título "**Suelos de un humedal salino y fluctuante: La Laguna de Gallocanta**" para optar al grado de Doctora por la Universidad de Zaragoza.

Igualmente hago constar que dicho trabajo corresponde al Proyecto de Tesis Doctoral aprobado por los responsables del programa de doctorado "Ordenación del Territorio y Medio Ambiente" del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, con fecha 30 de Noviembre de 2016, y

AUTORIZO

La presentación de la citada Tesis Doctoral

Y para que así conste a los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento en Zaragoza, a 15 de Marzo de 2017.



Fdo. Dr^a Carmen Castañeda del Álamo

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo de investigación ha sido sin duda fruto de un trabajo conjunto en el que he contado con el apoyo y la participación de muchas personas. Quiero agradecer a cada una de ellas, investigadores, compañeros, amigos y familiares que de una manera u otra me han aportado su granito de arena. He aprendido mucho de cada uno de ellos.

Quiero en primer lugar darle las gracias a mi directora Carmen Castañeda por haberme ofrecido la oportunidad de desarrollar esta Tesis con ella. Por haberme enseñado y formado durante estos cuatro años en tantos temas que parecían tan lejanos a mí. Agradecerle también su total disponibilidad, su tiempo y rigor en las correcciones que, sin duda, han hecho mejorar la calidad de esta Tesis y de las publicaciones. A Rafael Rodríguez, de la Universidad de Lleida, a quien agradezco todo lo que me ha enseñado sobre suelos. Deseo expresar además mi agradecimiento a F. Javier Gracia, Universidad de Cádiz, gran conocedor de la Laguna, por sus clases de geomorfología a pie de laguna y por explicarme con detalle los procesos lacustres que habíamos observado en la Laguna y por su participación en los artículos.

I want to thank Martin Rabenhorst from the University of Maryland (USA) for providing us the opportunity to test a pack of IRIS tubes here in a saline soil wetland, and also for his guidance, helpful advices and suggestions. I also wish to acknowledge the hospitality of Dr. Claire Jouany (INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, Toulouse, France), for all her help, orientation and advices during my scientific internship in Toulouse in her research group, and for her contribution in the study of the plant and soil fertility, and also I want to thank Eric Lacroix for his help and procedure explanations in the laboratory. A mi amigo y compañero Emilio por compartir la estancia y la experiencia conmigo.

A Juan Herrero por su orientación y apoyo cuando ha sido necesario, por su ayuda y comentarios para mejorar mi trabajo, y a todos los miembros que forman parte del grupo de investigación "Riegos, Agronomía y Medio Ambiente" de la EEAD-CSIC y del CITA, en especial al personal de laboratorio y de campo del departamento de suelo y agua por su gran ayuda en los muestreos y análisis de las muestras durante todo este tiempo.

Se agradece a Josep Antoni Conesa y Joan Pedrol del Departamento de Hortofruticultura de la Universidad de Lleida, la cesión de la cartografía provisional de los hábitats de la Laguna de Gallocanta. A AEMET por los datos meteorológicos de las estaciones del entorno lagunar y a la CHE por su aportación de datos y cartografía.

Esta tesis no se hubiera podido llevar a cabo sin la colaboración de todos los agricultores de los pueblos de la Laguna de Gallocanta (Bello, Las Cuerlas, Gallocanta,

Berrueco y Tornos), que me han permitido acceder a sus campos y por su interés por esta investigación. A la Oficina Comarcal Agroambiental de Calamocha y de Daroca, en especial a M^a José Pamplona y Emilio Barcelona.

Asimismo me gustaría darle las gracias a Jesús Lacruz, el palista, por su apoyo y total disponibilidad en campo cuando lo hemos requerido. A los guardas y APNs que vigilan la Laguna por tenernos a la vista en cualquier momento y desde cualquier lugar durante nuestros muestreos.

A todos mis compañeros de trabajo que han pasado por el despacho, por los buenos momentos que hemos compartido juntos. En especial a Octavio y David con los que he pasado mis últimos meses, sé que dejo la *Oficina del Crusito* en buenas manos. Gracias a los *Zulis* por los consejos, por las divertidas y variopintas conversaciones y por hacerme desconectar y sonreír. En especial a Laura e Iván por las confidencias y las risas.

Quiero darles las gracias a todos mis amigos que me han ayudado con sus conocimientos y con los que he podido disfrutar de mis escapadas nocturnas. Gracias en especial a Tamara por los rayos de sol que compartimos juntas, me encantas. A mi familia de grandes amigos: Jose, Nere, Edith, Adry y Nacho, y a los nuevos, por dejarme compartir mi alegría con vosotros aunque ahora estemos lejos. Y sobre todo a Guiye, por todo su tiempo, cariño, ánimo y consejos para intentar superar este periodo de la mejor forma posible.

Por último quiero agradecer a toda mi familia el tiempo que han pasado conmigo, y en especial a mis abuelas, siempre tengo presente de dónde vengo. Gracias a mis padres y a mi hermana, porque todo lo que habéis hecho siempre por mí me ha ayudado a seguir una vez más hacia adelante y conseguir superar otra etapa más con éxito. Sin vosotros esto no hubiera sido posible. Gracias!

INDICE

PRESENTACIÓN.....	XIX
RESUMEN	XXI
ABSTRACT	XXV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	3
2. OBJETIVOS	5
3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	5
CAPÍTULO 2. LA LAGUNA DE GALLOCANTA	7
1. SINGULARIDAD DE LA LAGUNA DE GALLOCANTA.....	9
2. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO.....	11
3. RASGOS CLIMÁTICOS	14
3.1. Precipitación	15
3.2. Temperatura	20
3.3. Déficit hídrico, evapotranspiración y viento.....	21
3.4. Régimen de temperatura y humedad del suelo	22
4. PRESENCIA DE LÁMINA DE AGUA EN LA LAGUNA	22
5. CARACTERIZACIÓN FÍSICO – QUÍMICA DEL AGUA FREÁTICA Y SUPERFICIAL	24
6. DISTRIBUCIÓN DE VEGETACIÓN NATURAL.....	27
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	31
1. TRABAJOS DE GABINETE	33
2. TRABAJOS DE CAMPO	34
2.1. Perfiles de suelo.....	34
2.2. Condiciones de reducción del suelo	35
2.3. Fertilidad del ecosistema suelo-planta	36
3. ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELO Y AGUA.....	38
4. FABRICACIÓN DE LÁMINAS DELGADAS	41
5. CÁLCULOS POSTERIORES.....	41
CAPÍTULO 4. EDAPHIC AND GEOMORPHIC EVIDENCES OF WATER LEVEL FLUCTUATIONS IN GALLOCANTA LAKE, NE SPAIN	43
RESUMEN	45
ABSTRACT	46

1. INTRODUCTION.....	47
2. STUDY AREA.....	48
2.1. Geographical and geological setting	48
2.2. Geomorphological setting.....	51
3. METHODS	52
4. RESULTS.....	54
4.1. Geomorphological context of the two lake margins.....	54
4.2. Soil composition and morphology	58
4.3. Soil color and redoximorphic features.....	65
5. DISCUSSION	68
5.1. Soil composition and texture	68
5.2. Soil hydric conditions along the toposequences.....	71
5.3. Redoximorphic features and palustrine conditions	71
5.4. Evidences of water level fluctuations	72
6. CONCLUSIONS	74
 CAPÍTULO 5. LATE QUATERNARY PEDOGENESIS OF LACUSTRINE TERRACES IN GALLOCANTA LAKE, NE SPAIN	 75
RESUMEN	77
ABSTRACT	78
1. INTRODUCTION.....	78
2. GALLOCANTA LAKE.....	80
2.1. General setting.....	80
2.2. Downwind palustrine area.....	81
3. MATERIAL AND METHODS.....	82
4. RESULTS AND DISCUSSION.....	83
4.1. Distribution of the lacustrine terraces	83
4.2. Geomorphological processes of terraces formation	87
4.3. Main characteristics of the soils and groundwater.....	89
4.4. Soil composition and texture	90
4.5. Pedogenic accumulations and redoximorphic features.....	99
4.6. Soil genesis under alternating conditions	102
4.7. Lacustrine terraces and historical records of water occurrence.....	102
5. CONCLUSIONS	105

CAPÍTULO 6. REDUCING CONDITIONS IN SOIL OF GALLOCANTA LAKE, NORTHEAST SPAIN 107

RESUMEN	109
ABSTRACT	110
1. INTRODUCTION	110
2. STUDY AREA	112
3. METHODOLOGY	113
3.1. Selection of sites	113
3.2. Installation and retrieval of the IRIS tubes	114
3.3. Laboratory analysis	116
4. RESULTS	117
4.1. Rainfall data during the survey	117
4.2. Main soil features	117
4.3. Groundwater characteristics	120
4.4. Iron oxide removal from the IRIS tubes	120
5. DISCUSSION	123
6. CONCLUSIONS	125

CAPÍTULO 7. SOIL FERTILITY AND PLANT NUTRITIONAL STATUS AT THE INTERFACE BETWEEN SALINE HABITATS AND AGRICULTURE 127

RESUMEN	129
ABSTRACT	130
1. INTRODUCTION	131
2. RAMSAR WETLAND SITES	132
3. MATERIAL AND METHODS	134
3.1. Sampling design	134
3.2. Plant and soil sampling	135
3.3. Soil characterization	135
3.4. Plant characterization	136
4. RESULTS	137
4.1. Soil salinity and composition	137
4.2. Ecosystem fertility	140
4.2.1. Soil nutrient content and cation exchange capacity	140
4.2.2. Nutritional status of plants	143
4.2.3. Biomass variability	144
5. DISCUSSION	146
5.1. Soil properties and ecosystem fertility	146
5.2. Nutrient availability in soils and the plant nutritional status	147

5.3. Biomass variability	148
6. CONCLUSIONS	150
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	151
1. CONCLUSIONES.....	153
2. PERSPECTIVAS FUTURAS	155
BIBLIOGRAFÍA	157
ANEJOS	177
ANEJO I. DATOS DE LA ESTACIÓN DE TORNOS	179
ANEJO II. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA	183
ANEJO III. DESCRIPCIÓN MACROMORFOLÓGICA DE SUELOS	187
ANEJO IV. DATOS ANALÍTICOS DE LAS MUESTRAS DE SUELO	269

Índice de figuras

CAPÍTULO 2

Figura 1. Laguna de Gallocanta (al fondo) vista desde el pie de la sierra de Valdelacasa (GA40) y el cereal de invierno durante la cosecha, en agosto de 2013.....	11
Figura 2. Mapa geológico simplificado de la cuenca endorreica de la Laguna de Gallocanta (modificado de CHE, 2003), con principales acequias, arroyos (A), barrancos (B) y topónimos.	14
Figura 3. Don Esteban Torrijo en la estación meteorológica de Tornos en junio de 2014. Este colaborador registró para AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) los datos diarios de precipitación y temperatura desde 1944 hasta 2015.	15
Figura 4. Estaciones meteorológicas en el entorno de la Laguna de Gallocanta. La rosa de los vientos muestra la frecuencia relativa y la dirección NO del viento moderado ($2 - 5 \text{ m s}^{-1}$) de invierno para el periodo 2000-2003 en la estación Los Picos (modificado de Martínez-Cob et al., 2010).	16
Figura 5. Precipitación anual en la estación meteorológica de Tornos para el periodo 1944 - 2014. Se indica la media (488.1 mm) y se resalta la precipitación máxima (759.9 mm) y mínima (232 mm).....	19
Figura 6. A) Diagrama ombrotérmico y precipitación media mensual, 40.3 mm (línea discontinua), en Tornos con datos de precipitación para el periodo 1974 - 2015 y de temperatura para el periodo 1969 - 2015. B) Precipitación media mensual y evapotranspiración mensual del periodo 2005 - 2014 de la estación de Daroca-SIAR.	21
Figura 7. Escalas instaladas en la Laguna de Gallocanta para medir el nivel de la lámina de agua. A) Escala antigua junto a la estación Los Picos (Foto tomada el 10-06-2005 por C. Castañeda). B) Escala nueva instalada en la laguna en 2001 (Foto tomada el 31-08-2012 por C. Castañeda). C) Escala nueva instalada en 2016 junto a la estación Los Picos (Foto tomada por J. Causapé tras la instalación de la escala).....	23
Figura 8. A) Nivel de la lámina de agua de la laguna desde 1974 hasta 2013. B) Síntesis de periodos históricos de aguas altas y aguas bajas en la laguna, con máximos de inundación y secado total señalados (máxima intensidad de color). C) Años normales, secos y húmedos según la precipitación anual (SSS, 2014) de Tornos desde 1944 hasta 2014.	24
Figura 9. Diagrama Piper con los tipos de agua freática y superficial en las diferentes zonas de muestreo de la Laguna de Gallocanta.....	26
Figura 10. Diagrama Schoeller-Berkaloff de las aguas subterráneas y superficial de la Laguna de Gallocanta.	27
Figura 11. Orlas de vegetación natural en zonas húmedas de la Laguna de Gallocanta. A) Vista de la orilla sur hacia Las Cuerlas, con orlas de <i>Salicornia</i> sp. (rojizo) junto a la playa, suelo desnudo, y praderas de <i>Puccinellia pungens</i> tierra adentro. B) Vista desde la orilla norte hacia Bello, con la laguna seca (marrón) y con acumulación de sales (blanco). C) Praderas de <i>Puccinellia pungens</i> y <i>Limonium</i> sp., en las terrazas intermedias de los Lagunazos, junto al extremo SE del fondo lagunar (arriba a la izquierda en color blanco).	29

CAPÍTULO 3

Figura 1. Localización de los suelos estudiados en el entorno de la Laguna de Gallocanta (azul) entre 2010 y 2015, mostrados sobre una imagen Landsat 5TM en falso color (RGB 543) tomada en abril de 1987.	36
Figura 2. Ejemplos de trabajos de campo. A) Instalación de un tubo IRIS en la orilla sur (GA30). B) Muestreo de los primeros 5 cm de suelo en praderas de <i>Puccinellia</i> sp. y C) muestreo de los primeros 25 cm de suelo y de cereal (trigo) para el estudio de la fertilidad del ecosistema suelo-plantas.	38
Figura 3. Ejemplos de trabajo de laboratorio. A) Pastas saturadas obtenidas para los diferentes horizontes del perfil GA35. B) Filtrado del extracto obtenido de la pasta saturada para medir CE. C) Secado en estufa de muestras vegetales y D) Muestras vegetales en celdas de 1 cm de ancho tras la adición de verde malaquita para su análisis colorimétrico por espectrometría.	40
Figura 4. Elaboración de láminas delgadas. A) Pastilla de 5 cm de ancho obtenida tras el corte de un bloque impregnado. B) Pegado de la pastilla en un portaobjetos para su posterior desbaste. C) Desbaste en rectificadora hasta obtener la lámina delgada de 30 μ m de espesor.	41

CAPÍTULO 4

Figure 1. Geological map (after García-Vera et al., 2009), the main streams, and weather stations within the study area at Gallocanta Lake.	50
Figure 2. Water depth of Gallocanta Lake from 1974 to 2002 (García-Vera et al., 2009).	51
Figure 3. Location of the soil profile sites in two margins in the central section of Gallocanta Lake. Orthophotographs were taken in 2006–2007. The main arroyos are indicated in blue. Black rectangles indicate the location of the areas shown in Figures 4 and 6.	54
Figure 4. Geomorphological map of a section of the NE shoreline within the central section of Gallocanta Lake (slightly modified from Castañeda et al., 2013a). The six soil sampling sites are indicated, GA23 to GA28.	55
Figure 5. The NE shoreline of Gallocanta Lake in summer 2013. A: Alluvial fans that extend from the base of the mountain, the vegetated lake margin, and the dry lake. B: sand barrier covered with pioneering halophytes; C: The lake floor and a vegetated marginal wetland with <i>Juncus</i> . Geographical locations are indicated in Figure 4.	56
Figure 6. Geomorphological map of the SW shoreline of the central section of Gallocanta Lake (modified from Castañeda et al., 2013a). Five soil sampling sites are indicated (GA19 to GA22 and GA29).	57
Figure 7. The SW shoreline of Gallocanta Lake in summer 2013. A: Near the mouth of Los Pozuelos arroyo, where it intersects a littoral sand bar; several small gullies erode the sands and form small alluvial fans on the dry arroyo thalweg. B: Sublittoral bar, emerged during a dry period, with tumbleweeds (<i>Salsola kali</i>) trapped on the silty surface.	58
Figure 8. Soil salinity (ECe) in the 11 pedons at Gallocanta Lake, expressed as the values from 25–cm-thick synthetic soil layers.	60

Figure 9. Macromorphological features of the soil profiles at the NW and SW margins of the central section of Gallocanta Lake.....	65
Figure 10. Micromorphological features of palustrine horizons at Gallocanta Lake. A: Lenticular gypsum accumulation and peloidal microstructure (GA19, Ag). B: Blocky microstructure (GA20, 4Cg4). C: Pendant with sequential aggradation and dark rims (GA22 Bwk); D: Calcite-rich groundmass with crystallitic b-fabric and carbonate coatings (GA19, 2Cg2). E: Carbonate crystals (GA20, 2Cg2). F: Charophyte oogonia (GA19, Ag); G: Ostracod shell remains in paleovalley soils (GA22, Bwk). H: Fe-Mn impregnative hypocoatings (GA19, Ag).	67
Figure 11. Soil composition along the soil transects at the NW and SW margins of Gallocanta Lake. The topographic profile and the main geomorphological features are indicated.	70
Figure 12. (A) Composite aerial contact prints of the central section of Gallocanta Lake, taken in September 1975 (from Pérez, 2014), and (B) ortophotograph taken in September 2006....	73

CAPÍTULO 5

Figure 1. False color composition (RGB 543) of a Landsat 5TM image (from the U.S. Geological Survey) acquired on 14/04/1987 showing Gallocanta Lake and its downwind palustrine area partially flooded. The nearest weather stations, Los Picos and Tornos, are marked. The wind rose shows the relative frequency and direction of the moderate (2.0 to 5.0 m s^{-1}) winter winds measured at a height of 2 m (modified from Martínez-Cob et al., 2010).....	81
Figure 2. Geomorphological map of the downwind palustrine area of Gallocanta Lake (see Figure 1 for general location). The nine soil profiles of the two soil toposequences studied, NW-SE and NE-SW, are marked.	85
Figure 3. Boxplots of elevation for the five stepped terraces forming the downwind palustrine area of Gallocanta Lake, obtained from LiDAR data. Interquartile range box, medians and their confidence intervals, and outliers are represented.	86
Figure 4. Terrace topography extracted from LiDAR DEM (see Figure 2 for scale) and the corresponding histograms showing the median (red vertical line).	87
Figure 5. Photographs taken during dry seasons showing the terraces of the palustrine area of Gallocanta Lake at different scales.	89
Figure 6. Soil salinity (ECe) of the studied profiles displayed for 25 cm -thick layers. Profiles are colored according to their mean salinity: very strongly saline and strongly saline soils are red; moderately saline soil is purple; and non-saline and slightly saline soils are green.	96
Figure 7. Soil profiles studied through the two perpendicular toposequences with the particle size distribution and ECe values (in red), calculated for the 25-cm thick synthetic soil layers. ...	98
Figure 8. Main morphological features of the soils studied along the NE-SW and NW-SE toposequences.....	100
Figure 9. Scheme of the lacustrine, semi-lacustrine, and detrital materials along the two toposequences studied.	101
Figure 10. Sequence of lacustrine, semi-lacustrine and detrital materials in four selected profiles (GA33, GA34, GA56 and GA55).....	101

Figure 11. The available water level records of Gallocanta Lake, including continuous (line) and point (dots) measurements, and the mean elevation of the five lacustrine terraces in the downwind palustrine area of Gallocanta Lake. The colored horizontal lines along the bottom represent: A) annual rainfall from 1944 above (blue) and below (orange) the normal year (Soil Survey Staff, 2014); and B) dry (orange), very dry (dark orange), and wet periods (blue and dark blue) as described in the literature (see references in the text).....104

CAPÍTULO 6

Figure 1. Colour-shaded LiDAR-derived digital elevation model of Gallocanta Lake with major contour lines and locations of the IRIS tubes.113

Figure 2. Evidence of iron and manganese mobilization in Gallocanta Lake: (a) in recently exposed soil at site 4, (b) at the soil surface in nearby areas subjected to intermittent flooding. Thin sections show redox micromorphic pedofeatures associated with voids (v), (c) manganese oxide (MnO) and iron–manganese oxide (FeMnO) impregnated hypocoatings observed with plane polarized light, Ayzg and (d) framboidal iron sulphide (FeS) coating observed with oblique incident light, 2Cyg3.....119

Figure 3. Photographs taken in the field of five replicate IRIS tubes from each site when they were extracted at the completion of the study.....121

Figure 4 Photographs of IRIS tubes taken in the laboratory that show the upper 30 cm of the tubes. Black areas correspond to the iron oxide coating removed and red boxes indicate the 15-cm section of the 30-cm tube with maximum removal of iron oxide coating.123

CAPÍTULO 7

Figure 1. Location of Guallar and Gallocanta Ramsar wetlands in the Ebro basin (inset) and on a false color composition (RGB 123) of the SPOT 5 image from 2009.....133

Figure 2. Schema of the topographic cross-section and distribution of sampling sites along the soil transects in Guallar (A) and Gallocanta (B). Plant design is adapted from Conesa et al. (2011): 1. *Sphenopus divaricatus* and *Hymenolobus procumbens*, 2. *Suaeda vera*, 3. Winter cereals, 4. *Salicornia* sp., 5. *Puccinellia* sp., and 6. *Limonium* sp. communities.135

Figure 3. Soil salinity (EC1:5) of Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) soils sampled along a transect from halophytes to crops, between 2013 and 2015.....137

Figure 4. A) Gypsum, calcium carbonate equivalent (CCE), organic matter (OM) and siliceous-silicatic material in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR). B) Particle size distribution (clay, silt and sand) in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR).140

Figure 5. A) Phosphorous and B) Nitrogen content of vegetation in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) wetlands.144

Figure 6. Rainfall from October to March, and the mean crop DMY of each year in A) Gallocanta and B) Guallar.....149

Índice de tablas

CAPÍTULO 2

Tabla 1. Principales características de las estaciones meteorológicas, coeficientes de correlación de Pearson (r) diario, semanal y mensual, número de datos correlacionados (N), y pendiente de la recta de regresión mensual (a).....	18
---	----

CAPÍTULO 3

Tabla 1. Síntesis de la información del territorio empleada para el análisis de la zona de estudio. .34	
Tabla 2. Fecha de muestreo, localización y altitud de los sitios muestreados en la Laguna de Gallocanta. Ver Figura 1 para localización y tipo de muestreo. (*Prospección complementaria).	37

CAPÍTULO 4

Table 1. Characteristics of the sampling sites at Gallocanta Lake, Spain.....	59
Table 2. Physical and chemical properties of the soils at Gallocanta Lake, Spain. See Figures 4 and 6 for pedons location. EC(1:5): Electrical conductivity of the 1:5 soil:water extract; ECe: Electrical conductivity of the saturated extract; PS: percentage of saturation of the saturated extract; pHp: pH of the saturated extract; CCE: Calcium carbonate equivalent; OM: organic matter; nd: Not determined.	61

CAPÍTULO 5

Table 1. Selected metrics of each of the five terraces as obtained from LiDAR data. C.V: coefficient of variation.	84
Table 2. Physical properties and main ions of the groundwater in the downwind palustrine area of Gallocanta Lake.....	90
Table 3. Physical and chemical properties of the nine soils studied.	91

CAPÍTULO 6

Table 1. Selected characteristics of sampled sites and groundwater.	115
Table 2. Main characteristics of the upper 50 cm of soil at the IRIS tubes sites.	118
Table 3. Percentage of iron oxide depleted from a 15-cm zone of the IRIS tubes within the upper 30 cm of the soil surface (the main zone of interest when considering hydric soil issues) and percentage of black FeS mottles deposited on the tube.	122

CAPÍTULO 7

Table 1. Mean (\pm standard deviation) of soil physical and chemical properties at Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) sites and the surface water samples.	139
Table 2. Soil and plant nutrient content, and CEC (cation exchange capacity) in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR). Mean \pm standard deviation. DMY: dry matter yield; PNI: Phosphorous	

nutritional index; NNI: nitrogen nutritional index. Grey shadowed rows correspond to the halophytes fringe.....	142
Table 3. Sampling date, growing season days, accumulated rainfall during the growing season each year (Rainfall), thermal time (TT), mean dry matter yield (DMY) and heat use efficiency (HUE) for halophytes and crops each year, at Gallocanta and Guallar wetlands.	145

PRESENTACIÓN

Esta Tesis se ha desarrollado en la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en Zaragoza, y ha sido posible gracias a la beca B087/13 para la formación y contratación de personal investigador de la Diputación General de Aragón, disfrutada entre el 1 de marzo de 2013 y el 28 de febrero de 2017, y a los siguientes proyectos de investigación:

- “Humedales salinos RAMSAR gestionados por el Gobierno de Aragón: enriquecimiento de los contenidos divulgativos en medios de información pública y bases para su seguimiento como hábitats sensibles a cambios climáticos”. Diputación General de Aragón (2012/GA LC 036). 2012-2013. IP: Carmen Castañeda del Álamo (EEAD-CSIC).
- “Los humedales salinos ante la agricultura y la conservación de suelos y organismos halófilos en tierras áridas”. Ministerio de Economía y Competitividad (AGL2012-40100). 2013-2015. IP: Juan Herrero Isern (EEAD-CSIC).
- “Suelos propios de regiones áridas: la experiencia local de México y España en sistemas agrícolas y protección ambiental”. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (2016SU0015). 2016-2017. IP: Juan Herrero Isern (EEAD-CSIC).

Así mismo el grupo de investigación RAMA (Riegos, Agronomía y Medio Ambiente) del Gobierno de Aragón (A-15) ha financiado una estancia predoctoral en el Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), de Toulouse, Francia, entre el 1 de mayo y 15 de junio de 2015.

La Tesis se encuadra en el Programa de Doctorado de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza (España).

RESUMEN

El suelo es un recurso natural no renovable cuyo papel es clave en la conservación y protección de los espacios naturales, ya que es sustento de hábitats para animales, plantas y microorganismos. Los humedales de interior no siempre han sido valorados como espacios naturales a proteger. Históricamente se han considerado zonas insalubres, algunos incluso se han desecado, y han estado sometidos a presión antrópica, especialmente a la intensificación agrícola. En este contexto, el conocimiento de los suelos en el entorno de los humedales es muy escaso o nulo, y todavía se omiten los estudios edáficos cuando se sientan las bases para elaborar los planes de gestión encaminados a la conservación de estos espacios naturales. La Laguna de Gallocanta, humedal Ramsar emblemático, de interior, salino y fluctuante, constituye un ejemplo de gestión que trasluce un claro esfuerzo de conciliación entre la conservación de hábitats singulares y el uso agrícola. La valoración y preservación de la laguna y su entorno, requiere conocer todos los recursos de que dispone, incluyendo el suelo como un aspecto básico a conservar.

El objetivo de esta Tesis es estudiar la génesis de los suelos en el entorno de la Laguna de Gallocanta, en zonas agrícolas y en hábitats naturales sometidos a inundación intermitente. El estudio se ha abordado, en primer lugar, a partir de una caracterización geomorfológica detallada del entorno lagunar en áreas representativas de ambientes contrastados, donde las condiciones hidrológicas y sedimentarias son más variables, apoyada en fotografías aéreas en época seca y topografía LiDAR de alta resolución. Ello ha permitido identificar unidades geomorfológicas activas y no activas, no reconocibles en campo, en los márgenes norte y sur de la laguna y la zona palustre de los Lagunazos, al SE de la laguna principal. El carácter sedimentario del margen sur de la laguna se manifiesta en el desarrollo de extensos depósitos litorales que incluyen secuencias de barreras arenosas, islas, playas actuales y playas no activas, y lagunas costeras. En el margen norte, de mayor pendiente, predominan los procesos erosivos producidos por el oleaje y formas como microacantilados, terrazas lacustres, y pequeños humedales costeros. La zona palustre de los Lagunazos, con una extensión de 500 ha aproximadamente, es el área con mayor acumulación de sedimentos del entorno lagunar, y en ella se han cartografiado cinco niveles de terrazas escalonadas y colgadas desde 1.6 m hasta 4.5 m sobre el fondo actual de la laguna. El análisis geomorfológico evidencia la existencia de una paleolaguna con una superficie de lámina de agua de al menos 2300 ha, frente a las 500 ha de superficie media de agua actual, y confirma la tendencia a la desecación de la laguna.

Se han caracterizado suelos de unidades geomorfológicas representativas de ambientes lacustres en ambos márgenes y en la zona palustre de la laguna. Se han estudiado 20 perfiles edáficos a la largo de gradientes de humedad, salinidad edáfica y

vegetación, incluyendo la caracterización físico-química de 107 muestras de suelo y 15 de agua subterránea.

Los resultados revelan una gran edafodiversidad y presencia de ambientes edáficos contrastados que han dado lugar a un diferente desarrollo del suelo y muestran diferente profundidad, color, salinidad y tamaño de partícula. La profundidad de los suelos varía desde 0.6 cm a 3.5 m, con una secuencia general de horizontes A-B-C. En general los horizontes superficiales, lacustres, tienen colores blancos, y los subsuperficiales, detríticos, son rojizos. Los suelos más salinos son los del fondo lagunar, actualmente expuestos durante varios meses al año, y los de las praderas periféricas y las terrazas bajas de los Lagunazos, alcanzando valores de 188.6 dS m^{-1} en extracto de saturación, cuatro veces mayor a la salinidad media del agua del mar. En general los suelos tienen carácter básico, con una mediana de pH de 8.1. La textura es moderadamente gruesa, con un alto contenido medio de arena (57%) y poca arcilla (20%). Los suelos tienen una composición predominantemente carbonatada aunque con un contenido muy variable en los horizontes, entre <2 y 72% de carbonato cálcico equivalente.

Los suelos se han desarrollado en materiales diversos incluyendo materiales detríticos de abanicos aluviales, sedimentos lacustres detríticos costeros, sedimentos lacustres finos de fondo, y sedimentos de origen eólico. Los colores contrastados de los diferentes horizontes edáficos, los truncamientos de la secuencia de horizontes, y los cambios sedimentarios a veces con discontinuidades erosivas como los “stone line”, revelan una clara alternancia de episodios lacustres y detríticos en el entorno lagunar.

Como rasgos edafogenéticos destacan: 1) las acumulaciones de carbonato en la mayoría de los suelos, aunque con muy diferente estado de desarrollo, siendo más desarrolladas en los suelos más antiguos de los abanicos aluviales; 2) las acumulaciones de sales solubles y yeso, presentes únicamente en suelos del fondo lagunar; y 3) caracteres redoximórficos indicadores de condiciones de reducción, en diferentes posiciones topográficas.

Los Inceptisoles se desarrollan en las zonas más elevadas y/o distantes del fondo lagunar actual, bajo condiciones de humedad del suelo xéricas. Los Aridisoles se desarrollan en las zonas bajas intermitentemente inundadas (fondo, orillas contiguas a la laguna y terrazas bajas) donde prevalece una fuerte salinidad edáfica y condiciones ácuicas o de saturación del suelo. En posiciones intermedias del margen norte se desarrollan suelos oscuros con materia orgánica, los Mollisoles.

Siendo la inundación un factor relevante en la génesis del suelo del entorno lagunar, se han estudiado las condiciones de reducción (saturación) del suelo en sitios representativos de diferente salinidad y frecuencia de inundación en el entorno inmediato de la laguna. La intensidad de las condiciones de reducción, cuantificadas a partir del porcentaje de lavado del recubrimiento de óxidos de hierro en cinco réplicas de tubos IRIS (Indicadores de Reducción en Suelos), muestra gran diferencia entre los cinco sitios

estudiados y entre réplicas. El método, herramienta estándar para el diagnóstico de condiciones reductoras y de suelos hídricos en EE.UU. (National Technical Committee for Hydric Soils), se ha explorado en suelos salinos y muy ricos en carbonato ($18 - 70\%$). La inundación intermitente, la elevada salinidad del suelo ($EC_e = 18 - 182 \text{ dS m}^{-1}$) y el bajo contenido de materia orgánica no han limitado la actividad microbiana que propicia la movilización de hierro, siendo entre 0.5% y 95.1% el promedio de recubrimiento de Fe movilizado dentro de los primeros 30 cm del suelo. Sin embargo, la composición carbonatada del suelo ha contribuido a retardar el proceso de reducción al limitar el descenso de pH, como se comprobó con muestras de suelo incubadas en laboratorio. La magnitud del lavado de los óxidos de hierro está relacionada con las diferencias topográficas que controlan cuándo el suelo está saturado y si las condiciones de reducción persisten en el suelo.

Siendo la agricultura el principal uso en el entorno lagunar, incluso dentro de la reserva, se ha considerado interesante caracterizar la fertilidad del ecosistema suelo-planta en la interfase entre el borde del humedal y los cultivos adyacentes. Se ha abordado el estudio en un continuo siguiendo el gradiente de salinidad edáfica, y llevando a cabo un estudio similar mediante otro transecto en la salada de Guallar (Bujaraloz, Zaragoza), por representar estos saladares un grado diferenciado de aridez dentro de la cuenca hidrográfica del Ebro.

La interfase entre el humedal y los cultivos es clave para entender la dinámica de nutrientes en esta zona. El estudio ha mostrado una gran variabilidad espacial y temporal de la fertilidad del ecosistema suelo-planta. Esta variabilidad está condicionada principalmente por las diferencias de las propiedades del suelo. En promedio, los suelos son francos o arenoso-francos con una capacidad de intercambio catiónico de baja a moderada ($CEC < 20 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$), independientemente de la salinidad del suelo, que aumenta a lo largo del transecto hacia el humedal de 0.3 a 3.7 dS m^{-1} . Los índices nutricionales estudiados, de nitrógeno y fósforo en planta, indican que no hay limitación de nutrientes para el crecimiento de los cereales en Gallocanta, de acuerdo con los contenidos de N y P del suelo. Se observa un alto contenido de P disponible en los suelos agrícolas, por encima de los requerimientos del cereal, y un alto nivel relativo también en el borde del humedal. Este último podría estar relacionado con episodios de inundación que contribuyen a la acumulación del P en el suelo. En cuanto a los nutrientes de las plantas, en general, están dentro de los rangos habituales tanto para los cereales como para los halófitos, aunque la alta relación N/P (16.2) de los halófitos indica una limitación de fósforo para el crecimiento. El estado nutricional de la planta muestra una distribución heterogénea relacionada con la variabilidad de las propiedades del suelo a lo largo del transecto. En este contexto, las medidas de gestión de estos humedales salinos y fluctuantes deben conciliar la protección de hábitats con el uso agrícola.

Todos los resultados recogidos en esta Tesis, sobre la morfología y composición de los suelos, la identificación de unidades geomorfológicas costeras, la presencia de condiciones redox asociadas a la inundación del suelo y el estado nutricional del ecosistema suelo-planta, permiten caracterizar este espacio natural y ampliar y avanzar en el conocimiento sobre las condiciones y procesos bajo los que se forma el suelo y poner de manifiesto los valores de la Laguna de Gallocanta como espacio natural singular a conservar. Como todo trabajo de investigación, esta Tesis ha servido para recopilar información de diferentes fuentes que han aportado datos de interés para interpretar los resultados. La investigación llevada a cabo abre nuevas direcciones de estudio sobre la génesis del suelo bajo condiciones fluctuantes de inundación.

ABSTRACT

Soil is a non-renewable natural resource that it is a key in the conservation and protection of natural areas, because it is the livelihood of habitats for animals, plants and microorganisms. Inland wetlands have not always been valued as natural areas to protect because of their great biodiversity. Historically wetlands have been considered unhealthy and some of them have even been desiccated, and subjected to anthropic pressure, especially to agricultural intensification. In this context, knowledge about the soils in the wetlands surroundings is very little or absent, and edaphic studies are still omitted when the basis for elaborating the management plans for the conservation of these natural spaces is established.

Gallocanta Lake, emblematic Ramsar wetland, inland, saline and fluctuating, is an example of management that shows an effort to reconcile conservation of unique habitats and the agricultural use. The valorization and preservation of the Lake and its environment requires knowing all the resources available to it, including the soil as a basic aspect to be conserved.

The objective of this thesis is to study the genesis of soils in Gallocanta Lake and its surrounding, in agricultural areas and in natural habitats subject to intermittent flooding. The study has been approached, firstly from a detailed geomorphological characterization of the lake surroundings in representative areas of contrasting environments, where the hydrological and sedimentary conditions are more variable, supported by aerial photographs in dry season and high resolution LiDAR topography. This has allowed the identification of active and non-active geomorphological units, not recognizable in the field, on the northern and southern margins of the lake and the palustrine area of Los Lagunazos. The sedimentary character of the southern margin of the lake has allowed the development of extensive coastal deposits that include sequences of sandy barriers, islands, current beaches and non-active beaches, and coastal lakes. In the north, with higher slope, it predominates the erosive processes produced by the waves and forms such as micro-cliffs, lacustrine terraces and small coastal wetlands. The palustrine area of the Lagunazos, located in the SE of the main lake, with an area of approximately 500 ha, is the area with the greatest accumulation of sediments in the lake surroundings, and five levels of terraces stepped from 1.6 m up to 4.5 m above the current lake bottom have been mapped. The geomorphological analysis show the existence of a paleolaguna with a water surface of at least 2300 ha, compared to the current surface area of 500 ha, and confirm the tendency for the lake to desiccate.

Soils of the geomorphological units, representative of lacustrine environments, have been characterized in both margins and in the palustrine area of the lake. 20 edaphic profiles have been studied along the gradients of flooding, soil salinity and vegetation, including the physical-chemical characterization of 107 soil samples and 15 groundwater samples.

The results reveal a great edafodiversity and the presence of contrasted edaphic environments that have given rise to a different soil development with different depths, colors, soil salinity and particle size. Soils have a depth ranging from 0.6 cm to 3.5 m and an overall sequence A-B-C. In general the soils show horizons with two different matrix colors, lacustrine surface horizons of white colors, and reddish detrital subsurface horizons. The very saline soils are those of the lake bottom, currently exposed for several months a year, as well as those of the peripheral prairies and the low terraces of the Lagunazos area, reaching values of 188.6 dS m^{-1} , four times higher than the average salinity of the sea water. In general, the soils have a basic character, with a median pH of 8.1 and a moderately coarse texture, with a high average sand content (57%) and little clay (20%). The soils have a predominantly carbonate composition, although with a very variable content in the horizons, between <2 and 72% of calcium carbonate equivalent.

Soils have been developed in varied materials including detrital materials of alluvial fans, coastal detrital lake sediments, fine bottom lake sediments, and sediments of wind origin. The contrasted colors of the different edaphic horizons, truncations of the horizons sequence, and sedimentary changes, sometimes with erosive discontinuities, such as stone lines, reveal a clear alternation of lacustrine and detrital episodes in the lake environment.

The pedogenesis is characterized mainly by the presence of carbonate accumulations in most soils, although with a very different development grade, being more developed in the oldest soils of alluvial fans; by the accumulations of soluble salts and gypsum that occur only in soils of the lake bottom, and by the presence of redoximorphic characteristics indicative of reduction conditions, in soils located in different topographic positions.

Inceptisols are developed in the higher and/or distant areas of the present lake bottom under xeric soil moisture conditions. Aridisols develop in intermittently flooded lowlands (bottom, contiguous shores and low terraces) where strong soil salinity prevails and aquic or soil saturation conditions prevail. In intermediate positions of the north margin they develop dark soils with organic matter, the Mollisols.

Since flooding is a relevant factor in the soil genesis of the lake environment, the conditions of soil reduction (saturation) in representative sites of different soil salinity and flood frequency in the immediate surroundings of the lake have been studied. The intensity of the reduction conditions, quantified from the percentage of the iron oxides coating remove in five replicates of IRIS tubes (Indicator of Reduction In Soil), shows a great difference between the five sites studied and between the tubes of the same site. The method, a standard tool for the diagnosis of reducing conditions and of water soils in the USA (National Technical Committee for Hydric Soils), has been explored in saline soils and very rich in carbonate (18 - 70%). Intermittent flooding, the high soil salinity ($\text{ECe} = 18 - 182 \text{ dS m}^{-1}$) and the low organic matter content have not limited the microbial activity that favors iron mobilization, with an average of 0.5% to 95.1% Fe coating

mobilized within the first 30 cm of the soil. However, the carbonatic composition of the soil has contributed to delay the reduction process by limiting the pH decrease, as was verified with soil samples incubated in the laboratory. The magnitude of the depletion of the iron oxides is related to the topographic differences that control when the soil is saturated and if the reduction conditions persist in the soil.

Since agriculture is the main land use in the wetland surroundings, even within the natural reserve, the fertility of the soil-plant ecosystem has been characterized. The study was carried out in the continuum from the crops to the natural habitats, formed by halophilic plants, following the gradient of edaphic salinity, and carrying out a parallel study in the Salada de Guallar (Bujaraloz, Zaragoza) with a differentiated grade of aridity within the river basin of the Ebro.

The interface between the wetland edge and the adjacent crops is key to understanding the dynamics of nutrients in this area. The study of the fertility of the soil-plant ecosystem has shown great spatial and temporal variability. This variability is conditioned mainly by differences in the soil properties. On average, the soils are loamy or sandy-loamy with a low to moderate cation exchange capacity ($\text{CEC} < 20 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$), regardless of soil salinity which increases along the transect towards the wetland from 0.3 to 3.7 dS m^{-1} . The nutritional indexes studied for nitrogen and phosphorus in the plant indicate that there is no nutrient limitation for the growth of the cereals in Gallocanta, according to the N and P content of the soil. The available P in the agricultural soils is above the cereal requirements and at the edge of the wetland there is a slight increase in P that could be related to flood events that contribute to the accumulation of water P in the soil. As for plant nutrients, in general, they are within the usual ranges for both cereals and halophytes, although the high N/P ratio (16.2 in Gallocanta) of halophytes indicates a limitation of phosphorus for growth. The nutritional status of the plant shows a heterogeneous distribution related to the variability of soil properties along the transect. In this context, management measures for these saline and fluctuating wetlands should reconcile habitat protection with agricultural use.

All the results collected in this Thesis about the morphology and composition of the soils, the identification of coastal geomorphological units, the presence of redox conditions associated with soil flooding and the nutritional status of the soil-plant ecosystem, allow the characterization of this natural area and to increase and to improve the knowledge about the conditions and processes under which the soil is formed and to show the value of the Gallocanta Lake as a singular natural area to be conserved. Like all research works, this Thesis has served to gather information from different sources that have contributed to compile data of interest to interpret the results. The elaboration of this Thesis opens new directions of study on the soil genesis under fluctuating conditions of flood.



CAPÍTULO 1.

Introducción

1. Antecedentes

El interés en el suelo y sus propiedades han estado ligados tradicionalmente a la agricultura, por lo que los suelos se han venido estudiando frecuentemente desde la perspectiva de la producción. A partir de los años 60 del siglo XX la percepción de las funciones del suelo se amplía hacia el reconocimiento del mismo como un ecosistema (Adhikari and Hartemink, 2016), coincidiendo con el desarrollo de medidas de protección del medio ambiente donde el suelo se considera un recurso no renovable a conservar (Blum, 2002; Jones et al., 2012).

La Comisión Europea impulsó la protección del suelo frente a las principales amenazas como la contaminación, erosión, sellado, pérdida de biodiversidad, salinización, etc., a través de la “Estrategia temática para la protección del suelo” (COM (2002) 179) y la propuesta de Directiva Marco para la protección del suelo (COM (2006) 232) retirada en 2014. El objetivo principal de la Estrategia temática es proteger el suelo evitando su degradación, preservando sus funciones y restaurándolo en caso necesario. Para conseguir estos objetivos, la Comisión Europea considera la vigilancia del suelo como uno de los pilares de las estrategias a desarrollar. España, como muchos países de la Unión Europea, no tiene reglamentación específica para la protección del suelo. Aspectos relacionados con la protección del suelo aparecen indirectamente como objetivos dentro de políticas ambientales generalistas o bien en actividades de control de la contaminación.

El suelo es un recurso no renovable que forma parte de los espacios naturales, reservas y zonas protegidas, y es clave en su conservación y protección. Los humedales son espacios naturales donde los ambientes acuáticos y terrestres forman parte de hábitats que sustentan una gran diversidad de plantas y animales. La frecuente omisión de los estudios del suelo en los planes de gestión de los humedales, probablemente se deba a que los éstos no siempre han sido valorados desde el punto de vista científico y de conservación, y a que siendo vistos como zonas insalubres (Williams, 2002) han soportado continua presión por la intensificación agrícola. Durante el siglo XX se han perdido más de la mitad de los humedales en el mundo (Mitsch y Gosselink, 2015). En España, Casado y Montes (1995) estiman una pérdida del 60% de la superficie total de humedales durante los últimos 200 años. Sin embargo, su puesta en valor ha aumentado en las últimas décadas a raíz de la obligada aplicación de Directivas Europeas sobre protección de aves y hábitats, encaminadas al desarrollo de la Red Natura 2000 (Galicia et al., 2015).

La mayoría de los trabajos de investigación sobre humedales se interesan por la conservación de la biodiversidad pero el suelo, soporte de esa biodiversidad, es

escasamente estudiado. En algunos casos se estudia la relación entre la formación de los suelos y la geomorfología de los humedales (Farpoor et al., 2012). Los suelos de los humedales han sido estudiados en EEUU, China, Canadá, Australia, Francia y Bélgica, entre otros países, llegando a incluir este tipo de suelos en sistemas nacionales e internacionales de clasificación de suelos como en la Canadian Soil Classification (1998), Chinese Soil Taxonomy (Li, 2001), Soil Taxonomy (SSS, 2014) y World Reference Base (IUSS Working Group, WRB, 2015).

La génesis de suelos en el entorno de humedales está ligada a las condiciones de saturación del suelo, anaerobias, de importancia desde el punto de vista ecológico, ambiental y agrícola (Richardson et al., 2001) y este hecho marca diferencias con suelos de ambientes agrícolas y forestales. Además, en zonas áridas y semiáridas como las de clima mediterráneo, donde la precipitación es irregular e inferior a la evaporación, los humedales de interior suelen ser estacionales y presentan lámina de agua que fluctúa acorde con las precipitaciones y otros meteoros. Son escasos los estudios edáficos de humedales de interior en condiciones de aridez, pudiendo citar los basados en criterios topográficos (Farpoor et al., 2012; Shabanova et al., 2015), o en la distribución de la vegetación (Aliat et al., 2016), y en rasgos geomorfológicos que permiten delimitar zonas inundables (Biggs et al., 2010). Otro de los aspectos críticos contemplados en la gestión de un humedal es el seguimiento de los registros de la lámina de agua y su funcionamiento hidrogeológico (López-Geta y Fornés, 2009).

España destaca dentro de Europa por su gran diversidad de sistemas acuáticos continentales, incluyendo los estacionales, con 1379 humedales de los cuales 1275 son de interior, abarcando tan solo un 13.6% de la superficie (Camacho, 2008). Sin embargo, los estudios sobre génesis de suelos en humedales son escasos e insuficientes destacando los llevados a cabo en las Tablas de Daimiel en Ciudad Real (Jiménez, 2014; García-Giménez et al., 2015), y en humedales costeros como Doñana en Huelva (Siljeström et al., 1994), la Albufera en Valencia (Moreno-Ramón et al., 2015) o las Salinas y Arenales de San Pedro en Murcia (Álvarez-Rogel et al., 2007).

La Laguna de Gallocanta, humedal salino de interior y referente internacional en la conservación de aves acuáticas (Leránóz y González, 2009) representa un hito en el contexto de la gestión del medio natural, especialmente por la necesidad de conciliar la conservación de hábitats singulares con el uso agrícola. El Plan de Ordenación de los Recursos Naturales que sienta las bases para la gestión de la Reserva Natural Dirigida de la Laguna de Gallocanta contempla el suelo como un sustrato para la producción agrícola y dentro de los objetivos para la conservación de los hábitats, únicamente se menciona el paisaje como aspecto a proteger y conservar sin hacer referencia a la necesidad de conocimiento del suelo para su conservación.

En esta Tesis se propone estudiar la génesis de suelos en el entorno de la Laguna de Gallocanta, en zonas agrícolas y hábitats naturales sometidos a inundación intermitente. Ello se aborda a partir de la caracterización geomorfológica de detalle y

mediante el estudio de perfiles de suelo seleccionados a la largo de gradientes de humedad, salinidad edáfica y distribución de la vegetación. Dado que las condiciones hídricas y el uso agrícola en el entorno del humedal son dos aspectos clave en su preservación y gestión, se estudian de forma específica las condiciones de reducción del suelo ligadas a los procesos de inundación y el estado nutricional del ecosistema suelo-planta incluyendo zonas agrícolas y hábitats naturales de vegetación salina.

2. Objetivos

El objetivo general de la Tesis es estudiar los suelos de zonas agrícolas y de hábitats naturales en el entorno de la Laguna de Gallocanta teniendo en cuenta las principales unidades geomorfológicas y la distribución de vegetación según las condiciones de salinidad y humedad del suelo.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- 1) Caracterizar la morfología y composición del suelo a lo largo de gradientes de humedad y de salinidad edáfica.
- 2) Identificar los procesos de edafización de terrazas lacustres asociadas a fluctuaciones recientes del nivel de agua de la laguna.
- 3) Determinar las condiciones de reducción del suelo teniendo en cuenta su composición y localización en el entorno lagunar.
- 4) Caracterizar la fertilidad del ecosistema suelo-planta en un gradiente de salinidad edáfica, abordando un estudio comparativo de la Laguna de Gallocanta y la salada de Guallar con diferente grado de aridez dentro de la cuenca del Ebro.

3. Estructura de la Tesis

La Tesis se estructura en ocho Capítulos, siendo los tres primeros la Introducción general, la caracterización de la zona de estudio y la metodología empleada, respectivamente. El Capítulo 1 introduce el tema de estudio haciendo referencia a la escasez de estudios de suelos en humedales en general, y de medios áridos en particular, y presenta el objetivo general y los objetivos específicos de esta Tesis. El Capítulo 2 describe la zona de estudio, incluyendo su singularidad como humedal salino y fluctuante, y los aspectos geológicos y climáticos generales, la presencia de lámina de agua y caracterización del agua freática, la distribución de vegetación del entorno del

humedal. En el Capítulo 3 se sintetiza la metodología de trabajo, la organización en tareas de gabinete, campo y laboratorio, y los métodos de análisis de las muestras de suelo y agua, así como la fabricación de láminas delgadas.

Los Capítulos 4 al 7 abordan aspectos concretos correspondientes a los objetivos específicos propuestos en la Tesis. El Capítulo 4 comprende el estudio de características edáficas de los márgenes norte y sur de la laguna, de contrastadas características litológicas y topográficas, mediante la prospección de 11 perfiles de suelo situados en dos toposecuencias, una en cada margen. En este capítulo se aborda el objetivo 1. El Capítulo 5 recoge el estudio de suelos de terrazas lacustres recientes en los Lagunazos, extensa área palustre situada al SE de la laguna, actualmente emergida aunque sometida a inundación intermitente. Se estudian 9 perfiles de suelo situados a lo largo de dos toposecuencias en las direcciones paralela y perpendicular a la del viento dominante (NO - SE). En este capítulo se abordan los objetivos 1 y 2.

El Capítulo 6 está dedicado al estudio de las condiciones de reducción del suelo y la cuantificación de la movilización de hierro mediante la instalación de tubos IRIS (Indicator of Reduction In Soils) en sitios representativos de diferente salinidad e inundación en el entorno inmediato de la laguna. En este capítulo se ha abordado el objetivo 3.

En el Capítulo 7 se estudia la fertilidad del ecosistema suelo-planta en un continuo desde el borde de la laguna hasta los cultivos adyacentes, a lo largo del gradiente de salinidad del suelo. Se estudian de forma paralela dos humedales salinos situados en agricultura de secano y representantes de un diferente grado de aridez dentro de la cuenca hidrográfica del Ebro: Gallocanta, en clima semiárido, y Guallar, en clima árido. En este capítulo se desarrolla el objetivo 4.

Finalmente, en el Capítulo 8 se sintetizan las conclusiones generales y las perspectivas de trabajo futuras.

La Tesis incluye cuatro anejos que corresponden al número de días sin registro de lluvia en la serie de Tornos (Anejo I), los datos analíticos de las muestras de agua (Anejo II), la descripción macromorfológica de los perfiles de suelo estudiados y fotografías de los perfiles (Anejo III) y los datos analíticos de las muestras de suelo (Anejo IV).

En la redacción de esta Tesis se han utilizado las lenguas castellana e inglesa. El castellano se ha empleado en los Capítulos 1 a 3 y 8, y en los Anejos. Los Capítulos 4 a 7, redactados en inglés, corresponden a artículos enviados a revistas científicas internacionales, tres de ellos ya publicados y uno en preparación, estando cada capítulo precedido por un resumen en castellano. En las expresiones numéricas, se ha conservado el punto como signo separador de los decimales en todo el texto (castellano e inglés) de la Tesis, siguiendo el Sistema Internacional.



CAPÍTULO 2.

La Laguna de Gallocanta

1. Singularidad de la Laguna de Gallocanta

La Laguna de Gallocanta se encuentra a 1000 m s.n.m. en el sector central de la Cordillera Ibérica, en el borde sur de la cuenca hidrográfica del Ebro, al pie de la sierra de Santa Cruz-Valdelacasa cuya altitud supera los 1400 m s.n.m. La laguna tiene una extensión de 14.4 km², con 2.8 km de ancho y 7.7 km de largo, con forma alargada en la dirección del viento dominante, NO-SE. Pertenece a 5 municipios (Berrueco, Gallocanta y Las Cuerlas en la provincia de Zaragoza, y Tornos y Bello en Teruel) y queda enmarcada en las Hojas 491 (Calamocha) y 490 (Odón) del Mapa Topográfico Nacional. La profundidad de la lámina de agua oscila desde el máximo registro disponible de 2.84 m en 1974 (Pérez-Bujarrabal, 2014), hasta su total desecación, con un promedio de 0.43 m de profundidad de agua desde 1974 hasta 2013.

La Laguna de Gallocanta es, junto con la laguna de Fuente de Piedra en Málaga, la mayor laguna salada continental de Europa. Como laguna endorreica de aguas saladas de la zona mediterránea del Paleártico Occidental, la de Gallocanta constituye un tipo específico de zona húmeda bastante raro en la actualidad. Destaca por la existencia de hábitats considerados prioritarios y sustenta poblaciones de plantas y animales importantes para mantener la biodiversidad biológica de la región biogeográfica mediterránea. Debido al carácter salino y endorreico en montaña, la laguna ha sido objeto de atención científica desde el siglo XIX en estudios diversos con fines geológicos, ecológicos, botánicos, geomorfológicos e hidrogeológicos (Hernández-Pacheco y Aranegui, 1926; Dantín-Cereceda, 1941; Aranzadi, 1980; Gómez et al., 1983; Comín et al., 1983, 1990; Gracia et al., 2002, entre otros). Su singular funcionamiento hidrológico, caracterizado por la alternancia de periodos de inundación con periodos de ausencia de agua en superficie, permite la existencia de comunidades de plantas adaptadas a la salinidad edáfica y a las condiciones fluctuantes de humedad.

Acoge de manera regular una importante población de aves acuáticas y alberga el 80% de la población de grulla común (*Grus grus*) del Paleártico Occidental durante sus migraciones. Forma parte de la lista Ramsar de humedales de importancia internacional y de la red Natura 2000, por medio de la cual se pretende garantizar una adecuada conservación de la biodiversidad de las áreas naturales protegidas. La Laguna de Gallocanta está gestionada por el Gobierno de Aragón como Reserva Natural Dirigida desde el año 2006, tras la aprobación del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales, PORN, que establece el régimen jurídico para su protección y gestión. La Reserva, con una superficie total de 1924 ha, comprende: el fondo inundable y la llanura perilagunar. Ésta corresponde a materiales finos recientes del Cuaternario donde se desarrollan prados húmedos salinos que se inundan en periodos de aguas altas. Según

datos de las declaraciones de la PAC (Política Agraria común) de 2014, aproximadamente el 48% de la superficie de la Reserva, excluida la superficie del fondo inundable y las masas de agua, está declarada como pastizales y pastos arbustivos, localizados en las zonas más húmedas. Un 30% se declara como tierras arables, dedicadas principalmente al cereal de invierno, que se localizan en las zonas no salinas y ligeramente elevadas, hasta 5.5 m por encima del fondo lagunar actual.

La Zona Periférica de Protección de la laguna se extiende alrededor de la Reserva hasta unos 3 km de distancia del borde de la laguna y comprende 4553 ha dedicadas mayormente al secano. Predomina el cereal de invierno (Figura 1), trigo y cebada principalmente, centeno, avena, girasol y leguminosas (esparceta y veza) con una producción media de cereal de 2000 - 2500 kg ha⁻¹. En general, las parcelas de cultivo son pequeñas y frecuentemente están distribuidas en estrechas fajas paralelas y orientadas en sentido de la pendiente, hacia la laguna. Los cultivos de regadío son menos frecuentes, 400 ha en toda la cuenca de Gallocanta frente a las 20 000 ha de secano, debido en parte a la limitación de concesiones de extracción de agua para la preservación de los hábitats de la laguna (CHE, 2003). El regadío se localiza en los municipios de Tornos y Bello, siendo la remolacha, cebada, patata y girasol los cultivos más frecuentes.

Las prácticas agrícolas están reguladas por la aplicación de siete medidas agroambientales encaminadas a compatibilizar la agricultura con la conservación de la laguna y sus hábitats. La mayoría de las medidas están gestionadas por la Dirección General de la Conservación del Medio Natural del Gobierno de Aragón, excepto el mantenimiento del pastoreo en prados y pastizales, que es gestionada por la Dirección General de Producción Agraria. La generación de alimento para la avifauna es una medida de aplicación específica en Gallocanta, tanto dentro de la Reserva Natural Dirigida como fuera del ámbito del PORN y afecta al 77% de la superficie de cultivo de los cinco municipios que limitan con la laguna (Jiménez-Castañeda, 2014). El resto de medidas aplicables al entorno lagunar son: la retirada del cultivo en tierras con cultivos herbáceos de secano en zonas perilagunares; la protección del arbolado no productivo; y la generación de corredores biológicos, tanto en el área de la Red Natura 2000, como en aquellas zonas de mayor presencia de fauna. La retirada de tierras en zonas perilagunares afecta principalmente al municipio de Bello y la creación de corredores biológicos se aplica en los Lagunazos (Figura 2) (Jiménez-Castañeda et al., 2015).



Figura 1. Laguna de Gallocanta (al fondo) vista desde el pie de la sierra de Valdelacasa (GA40) y el cereal de invierno durante la cosecha, en agosto de 2013.

2. Marco geológico e hidrogeológico

La laguna ocupa el fondo de una depresión endorreica cuaternaria de 550 km² de extensión (Figura 2). El proceso de formación de la laguna está relacionado con los procesos de corrosión kárstica que, desde finales del Terciario y durante el Cuaternario, erosionaron los materiales calcáreos preexistentes en gran parte de la cuenca (Gracia et al., 2002). Ello dio lugar a una profundización del paisaje de más de 150 m hasta llegar a un sustrato impermeable, y a la formación de un polje donde se formó la laguna (Gracia et al., 2009).

A grandes rasgos, siguiendo el esquema de síntesis geológico de Hernández-Pacheco y Aranegui (1926) y Aranzadi (1980), en la cuenca hidrológica de Gallocanta se identifican tres tipos de materiales geológicos: silíceos, calcáreos y mixtos, que corresponden a los sectores NE y SO de la cuenca, y al área más deprimida, respectivamente (Figura 2). Al NE de la cuenca, las sierras de Santa Cruz - Valdelacasa están formadas por cuarcitas y pizarras del Paleozoico (Hernández et al., 1980; Olivé et al., 1980) y escasos afloramientos discontinuos de materiales calcáreos del Triásico Medio. Al SO predominan los materiales calcáreos del Jurásico y Cretácico formando extensos afloramientos con estratos horizontales o suavemente plegados. Los materiales más recientes, del Cuaternario, cubren con poco espesor los materiales anteriores y están formados por gravas sueltas, arenas y arcillas arrastradas por arroyos, conos de deyección, y por depósitos lacustres (Gracia, 2009), Figura 2. En estos materiales cuaternarios Aranzadi (1980) resalta la existencia de frecuentes clastos calcáreos,

nódulos o cementaciones carbonatadas y caliches. La laguna se asienta sobre un sustrato del Triásico Superior formado por arcillas, margas, yeso y sales más solubles.

Los materiales del Paleozoico son poco permeables y favorecen la escorrentía superficial y subsuperficial dando lugar a fuentes, manantiales y surgencias permanentes, aunque de escaso caudal, localizadas al pie de la sierra (Figura 2). El sustrato arcilloso y salino de la laguna es impermeable y dificulta la infiltración, contribuyendo a la acumulación de agua y a su elevada salinidad. Las gravas y arenas cuaternarias son muy permeables debido a su alta porosidad. En cuanto a los sedimentos de la laguna, los estudios de Calvo et al. (1978) y Aranzadi (1980) ponen de manifiesto su carácter carbonatado y su escasa profundidad. Estudios limnológicos posteriores (Pérez et al., 2002; Roc y Pérez, 2003) identifican una sucesión de tres periodos sedimentarios en el fondo de la laguna: aluvial, lacustre carbonatado y lacustre carbonatado-evaporítico. A partir de la mineralogía y geoquímica de dichos sedimentos se han reconstruido las etapas de sedimentación y se ha interpretado el paleoclima y su correspondencia con las fluctuaciones de la lámina de agua (Burjach et al., 1996; Schüt, 1998; Rodó et al., 2002; Luzón et al., 2007a).

Estas fluctuaciones de lámina de agua han dejado evidencias en el entorno lagunar. Se pueden identificar formas costeras actualmente desconectadas de la dinámica lacustre, colonizadas por vegetación e incluso cultivadas, junto a formas costeras activas. La orilla sur, debido a su escasa pendiente, <1%, y al aporte de materiales procedentes del arroyo de los Pozuelos (Figura 2), es un margen sedimentario que exhibe bandas paralelas a la laguna de depósitos litorales de limos, barreras arenosas, islas y playas, desarrollándose pequeñas lagunas costeras que permanecen como depósitos de lodos y que son activas en periodos de aguas altas. En cambio, en el margen norte, de mayor pendiente, predominan los procesos erosivos producidos por el oleaje favorecido por la orientación NO de los vientos. En este margen se han identificado microacantilados, terrazas lacustres, y pequeños humedales costeros separados de la laguna por barreras arenosas (Castañeda et al., 2013a).

La laguna es de reciente formación, como se desprende de la escasa profundidad de los sedimentos lacustres y de las dataciones disponibles. Se ha estimado una edad de $12\,230 \pm 70$ años AP (Antes del Presente) mediante dataciones con ^{14}C en sedimentos lacustres obtenidos mediante sondeos a 95 cm de profundidad (Burjachs et al., 1996) y de $32\,650 \pm 480$ años AP a 170 cm (Rodó, 1997). Posteriormente se ha obtenido una edad de unos $26\,369 \pm 302$ años AP mediante datación con ^{14}C en sedimentos a 128 cm de profundidad (Luzón et al., 2007a).

La cuenca hidrológica de Gallocanta presenta como peculiaridad la no coincidencia de la cuencas superficial y subterránea (CHE, 2003). Las principales aportaciones de agua a la laguna proceden de la escorrentía superficial y subterránea por un lado, y de la precipitación directa en la laguna por otro, en porcentajes similares. Los principales acuíferos que alimentan la laguna son los materiales carbonatados del

Mesozoico (Muschelkak, Jurásico y Cretácico Superior), formados por calizas y dolomías, y los materiales perilagunares del Cuaternario, mayormente gravas y arenas. El acuífero cuaternario es el de mayor extensión superficial aunque tiene poco espesor, 5 m, y descarga directamente a la laguna de forma subterránea funcionando como transmisor del acuífero carbonatado (CHE, 2003; García-Vera et al., 2009). Las salidas de agua se producen en gran parte por evaporación directa de la lámina de agua aunque la evaporación capilar supone una tercera parte de las salidas de agua ya que puede afectar a una extensión significativa del fondo inundable alrededor de la lámina de agua (CHE, 2003; García-Vera et al., 2009).

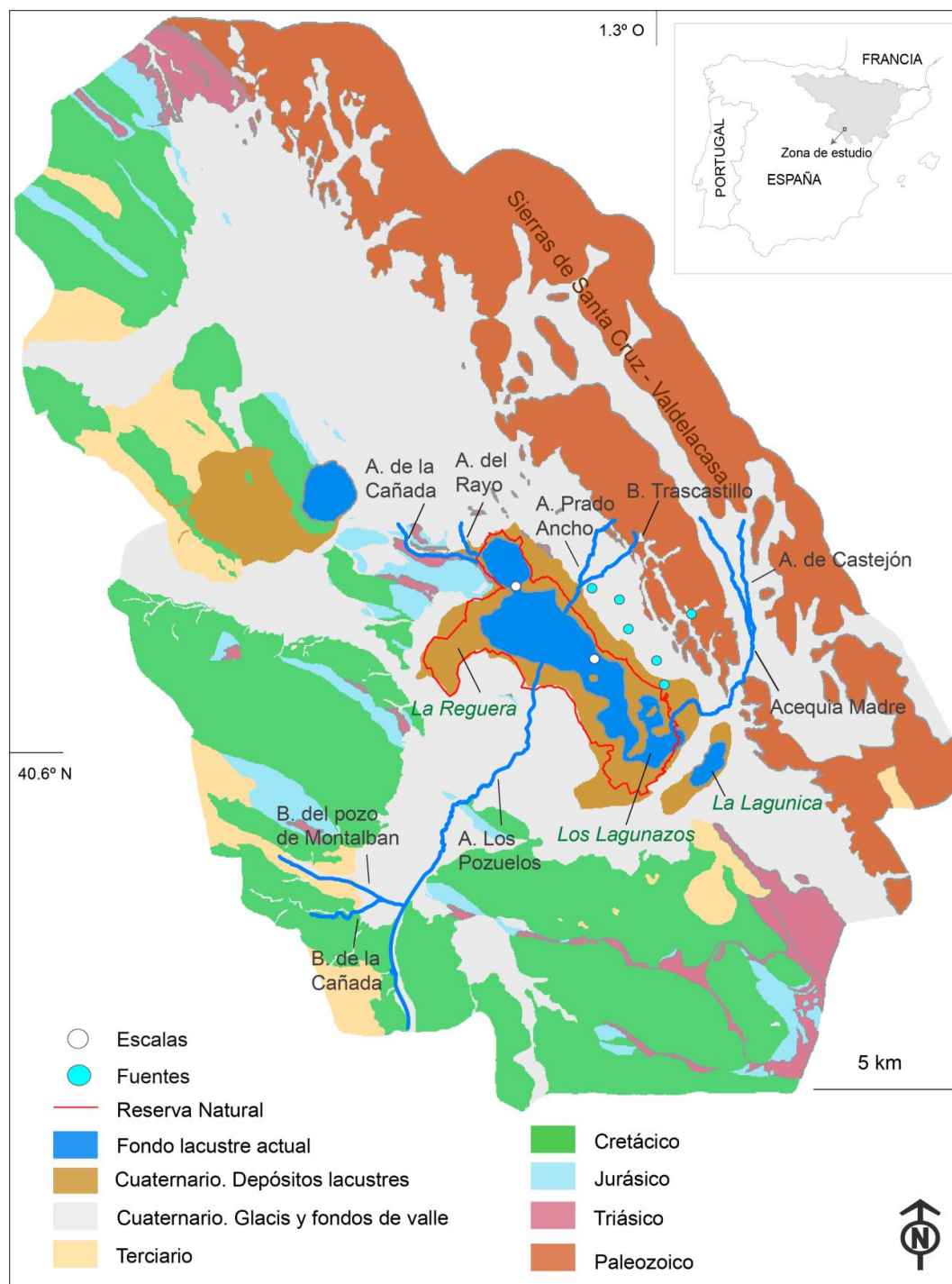


Figura 2. Mapa geológico simplificado de la cuenca endorreica de la Laguna de Gallocanta (modificado de CHE, 2003), con principales acequias, arroyos (A), barrancos (B) y topónimos.

3. Rasgos climáticos

El clima de la laguna y su entorno es mediterráneo semiárido-mesotérmico (Liso y Ascaso, 1969) típico de estepas de latitudes intermedias.

3.1. Precipitación

La estación meteorológica de Tornos, 1943 - 2015 (Figura 3), la más antigua cercana a la laguna, ha sido la más empleada para caracterizar las condiciones climáticas de la cuenca de Gallocanta (Guiral, 1983; Ascaso y Casals, 1985) y para relacionar las lluvias con las fluctuaciones de la lámina de agua (Comín et al., 1983, 1990). Anteriormente Hernández-Pacheco y Aranegui (1926) emplearon datos de estaciones más alejadas como la de Lechago, a 17 km de la laguna (Figura 4), con una precipitación media anual de 422.8 mm (1919 - 1923). Posteriormente, Liso y Ascaso (1969) caracterizaron el clima de la laguna con datos de 3 años de una antigua estación meteorológica en Gallocanta y obtuvieron una precipitación anual de 399 mm, mientras que Aranzadi (1980) da una lluvia anual de 500 mm con las estaciones de Las Cuerlas, Odón, Bello y Tornos. Más tarde, Pérez y García (2000) emplearon datos de la estación meteorológica de Daroca, localizada en la vertiente norte de la sierra de Santa Cruz - Valdelacasa, a 16 km de la laguna y a unos 800 m s.n.m. (Figura 4), obteniendo una media de 421.8 mm anuales a partir de registros de 37 años (1961 - 1999).



Figura 3. Don Esteban Torrijo en la estación meteorológica de Tornos en junio de 2014. Este colaborador registró para AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) los datos diarios de precipitación y temperatura desde 1944 hasta 2015.

La instalación, en el año 2000, de la estación meteorológica automática Los Picos en la misma orilla de la laguna (Figura 4), ha permitido establecer balances hídricos y modelos de funcionamiento hidrogeológico de la laguna (CHE, 2003; 2004) así como estudiar la distribución estacional del viento y su comparación con zonas ventosas de regadío en Aragón (Martínez-Cob et al., 2010). La lluvia anual en esta estación es 347 mm. Las diferencias de precipitación media obtenidas en las diferentes estaciones de la zona, incluso considerando un mismo periodo de tiempo, confirma la irregular distribución espacial de las lluvias en el entorno de la laguna.

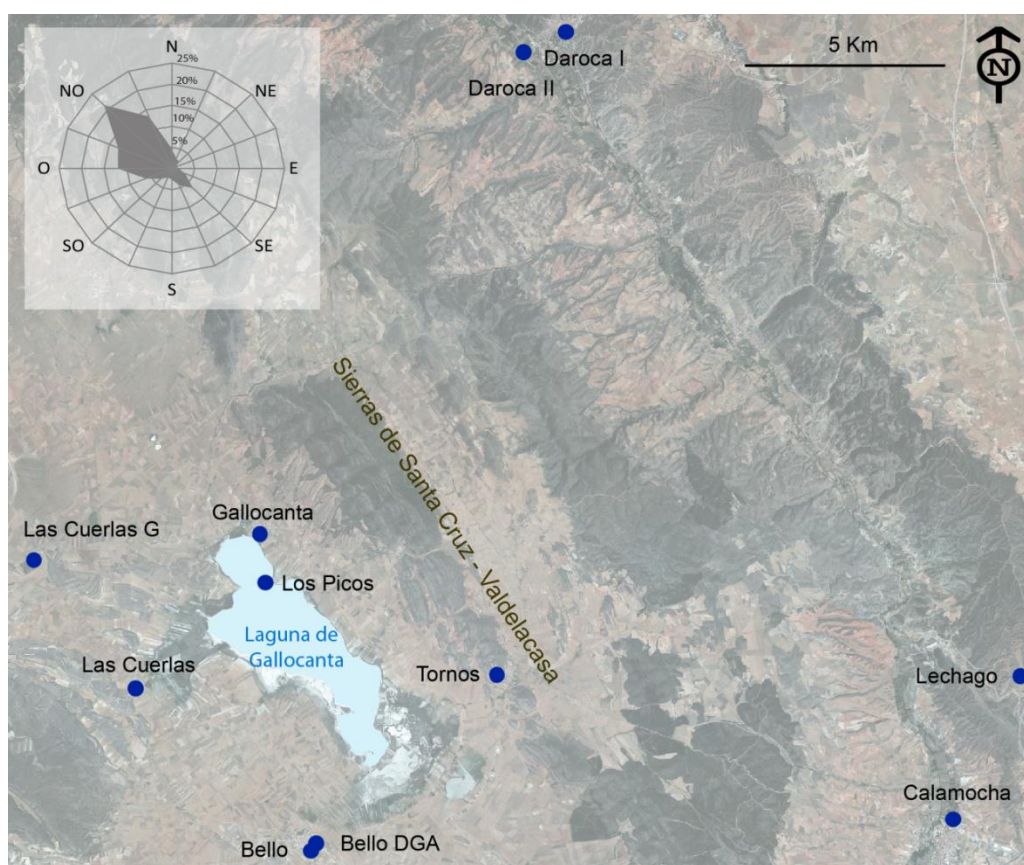


Figura 4. Estaciones meteorológicas en el entorno de la Laguna de Gallocanta. La rosa de los vientos muestra la frecuencia relativa y la dirección NO del viento moderado ($2 - 5 \text{ m s}^{-1}$) de invierno para el periodo 2000-2003 en la estación Los Picos (modificado de Martínez-Cob et al., 2010).

En esta Tesis se ha considerado Tornos como la estación de referencia por tener un periodo de funcionamiento de 71 años, desde diciembre de 1943 hasta su cierre en agosto de 2015. La serie consta de un total de 26 207 días, de los cuales un 3.4% (895 días) carecen de registro (Anejo I). Para completar la serie de precipitación diaria de Tornos se han recopilado los datos de nueve estaciones meteorológicas cercanas a la laguna (Tabla 1) y cuyos registros varían entre 104 años (Daroca-I) y cuatro años

(Daroca-II). Las estaciones cuyos datos se han analizado son gestionadas por diferentes organismos que suministran sus correspondientes datos: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), y Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (red SIAR, Sistema de Información Agroclimática para el Regadío).

Se ha analizado la correlación existente entre los valores de precipitación (P) diaria, semanal y mensual de cada estación y la de Tornos (Tabla 1). Se han considerado las semanas con registros completos y los meses con al menos 27 - 28 días de registro. Se han correlacionado únicamente valores donde $P > 0$ y se ha hecho que la recta pase por el origen. El coeficiente de correlación de Pearson, r , presenta valores bajos para la precipitación diaria, entre 0.45 y 0.67 (Tabla 1), debido a su alta variabilidad influenciada por la topografía y orientación del terreno. Sin embargo, los datos mensuales muestran siempre mejor correlación, con valores de r entre 0.72 y 0.91, por lo que se han empleado estas regresiones para completar la serie de datos de Tornos. Las estaciones que muestran mejor correlación con Tornos y cuyo periodo de registro es más largo, se han seleccionado como candidatas.

Todas las estaciones analizadas muestran un valor de r superior a 0.7 para datos mensuales a pesar de las diferencias en distancia y elevación (Tabla 1). La estación Daroca-I, a unos 16 km de la laguna y con una orientación norte respecto a la sierra (Figura 4), y con 193 meses de registro, tiene un coeficiente de correlación alto, $r = 0.89$ (Tabla 1), por lo que se ha seleccionado como primera candidata. En segundo lugar se emplearon datos de Las Cuerlas-G, con un coeficiente similar ($r = 0.82$) para un periodo de 168 meses. En tercer lugar se emplearon las estaciones Las Cuerlas ($r = 0.72$) y Bello ($r = 0.85$) por ser las únicas con datos entre 1968 y 1972, necesarios para completar la serie. La estación meteorológica de Calamocha no se ha considerado candidata porque requería integrar tres estaciones localizadas en lugares y altitudes diferentes.

Tabla 1. Principales características de las estaciones meteorológicas, coeficientes de correlación de Pearson (*r*) diario, semanal y mensual, número de datos correlacionados (*N*), y pendiente de la recta de regresión mensual (*a*).

Estaciones	Altitud* m s.n.m.	Distancia** km	Periodo de registro disponible	Diario		Semanal		Mensual		<i>a</i>
				<i>r</i>	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>N</i>	
Bello***	1006.7	5	1969-1979 y 2009-2016	0.67	1503	0.87	436	0.85	78	0.80
Bello DGA	1004.5	5	1992-2016	0.61	1581	0.85	418	0.91	52	0.82
Calamocha	884.4	16	1942-2016	0.55	6634	0.72	2214	0.81	443	
Daroca-I***	815.3	16	1909-2016	0.62	7394	0.81	1803	0.89	193	0.88
Daroca-II	815.3	16	2009-2014	0.65	427	0.8	130	0.85	27	0.78
Daroca-SIAR	746.7	16	2005-2016	0.58	1153	0.83	316	0.88	66	0.81
Las Cuerlas***	1006.6	3	1968-1976	0.45	505	0.77	114	0.72	14	0.82
Las Cuerlas-G***	1019.2	5	1975-2012	0.58	3774	0.78	1096	0.82	168	0.81
Los Picos	993.8	0	2000-2016	0.47	1716	0.77	440	0.79	73	0.74
Tornos	1020.9	3.5	1943-2015							

*Obtenida del modelo digital del terreno LiDAR.

**Distancia aproximada en línea recta desde cada estación hasta la orilla más cercana de la laguna.

***Estaciones seleccionadas como candidatas.

Con las ecuaciones de regresión obtenidas se ha estimado la precipitación mensual de los meses incompletos de Tornos. A partir de dicha precipitación mensual estimada (*P*) se ha obtenido la *P* diaria de acuerdo con tres criterios:

- Si la lluvia mensual estimada es menor o igual a la registrada, se completa la *P* diaria de Tornos con valor *P* = 0 mm.
- Si la lluvia mensual estimada es mayor que la registrada, se procede de la siguiente manera:
 - Si ha llovido en la estación candidata, *P* > 0: los días incompletos de Tornos toman un único valor promedio calculado como el cociente de la diferencia entre precipitación mensual estimada y registrada, entre el *n*^o de días con lluvia en la estación candidata:

$$P(\text{Tornos})\text{día estimada} = \frac{P(\text{Tornos})\text{mes estimada} - P(\text{Tornos})\text{mes registrada}}{n^{\circ} \text{ días con } P(\text{candidata}) > 0 \text{ mm}}$$

- Los días en los que no ha llovido en la estación candidata (*P* = 0), Tornos se completa igualmente con un valor de 0 mm.

La lluvia diaria así obtenida para la estación de Tornos representa la serie completa más larga disponible en el entorno más cercano a la laguna, sólo superada en

extensión temporal por Daroca-I. La precipitación anual resultante es 488.1 mm para el periodo 1944 - 2014, con marcadas fluctuaciones interanuales desde los 759.9 mm en 1959 hasta los 232.3 mm en 2001 (Figura 5). Como promedio llueve unos 94 días al año. Se recogen menos de 5 mm el 70% de los días y más de 20 mm sólo el 4% de los mismos. La precipitación anual en el periodo 2000 - 2014 es 457 mm, un 6.4% inferior a la media de la serie completa. En Los Picos se tienen 347 mm de lluvia anual para este mismo periodo, lo que indica que en la misma laguna se ha registrado un 29% menos de lluvia que en Tornos, situada al pie de la sierra a 3.5 km de la laguna y 27.1 m por encima de su orilla.

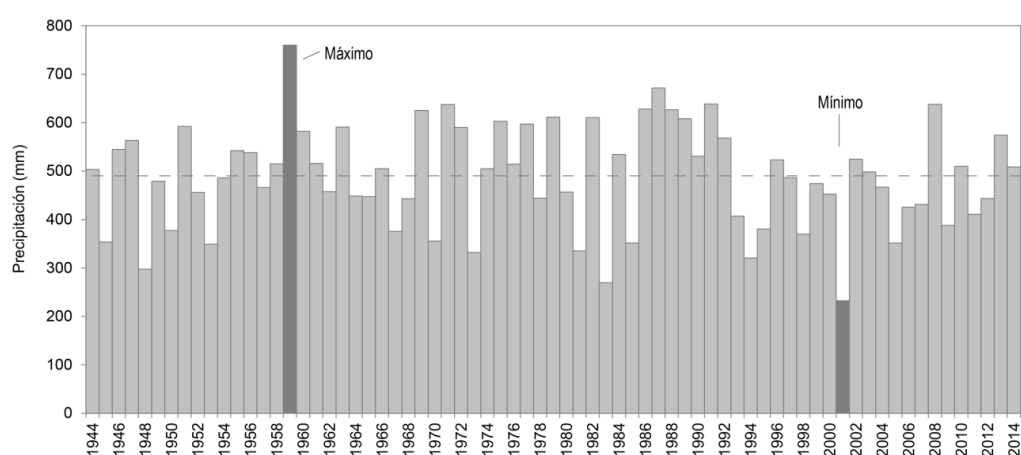


Figura 5. Precipitación anual en la estación meteorológica de Tornos para el periodo 1944 - 2014. Se indica la media (488.1 mm) y se resalta la precipitación máxima (759.9 mm) y mínima (232 mm).

Las estaciones más lluviosas son primavera y otoño, con una media de 152.9 mm y 128.9 mm, respectivamente. La precipitación media en verano, 113.9 mm, refleja la importancia de los eventos tormentosos. El invierno es la estación más seca del año, con 92.1 mm. La precipitación media mensual es 40.7 mm, siendo máxima en mayo (71.4 mm) y mínima en febrero (27.9 mm). Las precipitaciones mensuales de abril, mayo y junio superan la media, observándose una marcada diferencia entre una primavera lluviosa y un verano seco (Figura 6A). En septiembre, octubre y noviembre, la precipitación mensual vuelve a superar la media, manteniendo un volumen de precipitaciones estable de 43 mm de media. El 16 de junio de 1944 se registró el máximo diario de toda la serie, 99.5 mm.

3.2. Temperatura

La estación de Tornos cuenta con una serie de 47 años (1969 - 2015) de datos diarios de temperatura con un 98.4% de días con registro. La temperatura media anual es 11.2°C, 0.5°C por encima de la media del periodo entre 1955 y 1980 (Guiral, 1983) y 0.6 °C por debajo de la media de los últimos 15 años. La temperatura media mensual muestra una notable oscilación térmica, con los valores extremos en enero y julio, 2.7°C y 21.6°C, respectivamente (Figura 6A).

Hay 64°C de diferencia entre las temperaturas máxima y mínima absolutas registradas en esta estación, 43°C (julio de 1969) y -21°C (enero de 1971), respectivamente. En los últimos 15 años, la oscilación térmica es menor, 59°C, con extremos alcanzados de -18°C en diciembre de 2001 y 41°C en agosto de 2012. Las medias de las temperaturas mínimas se mantienen por debajo de 0°C entre diciembre y marzo, con heladas frecuentes el 31% de días al año como promedio. La temperatura media de julio y agosto es 21.5°C (Figura 6A), valor que indica veranos no excesivamente calurosos, siendo las medias de las temperaturas máximas para esos meses, 30.9 y 30.6°C, respectivamente. La temperatura máxima ha sido igual o superior a 35°C el 4.8% de los días de toda la serie.

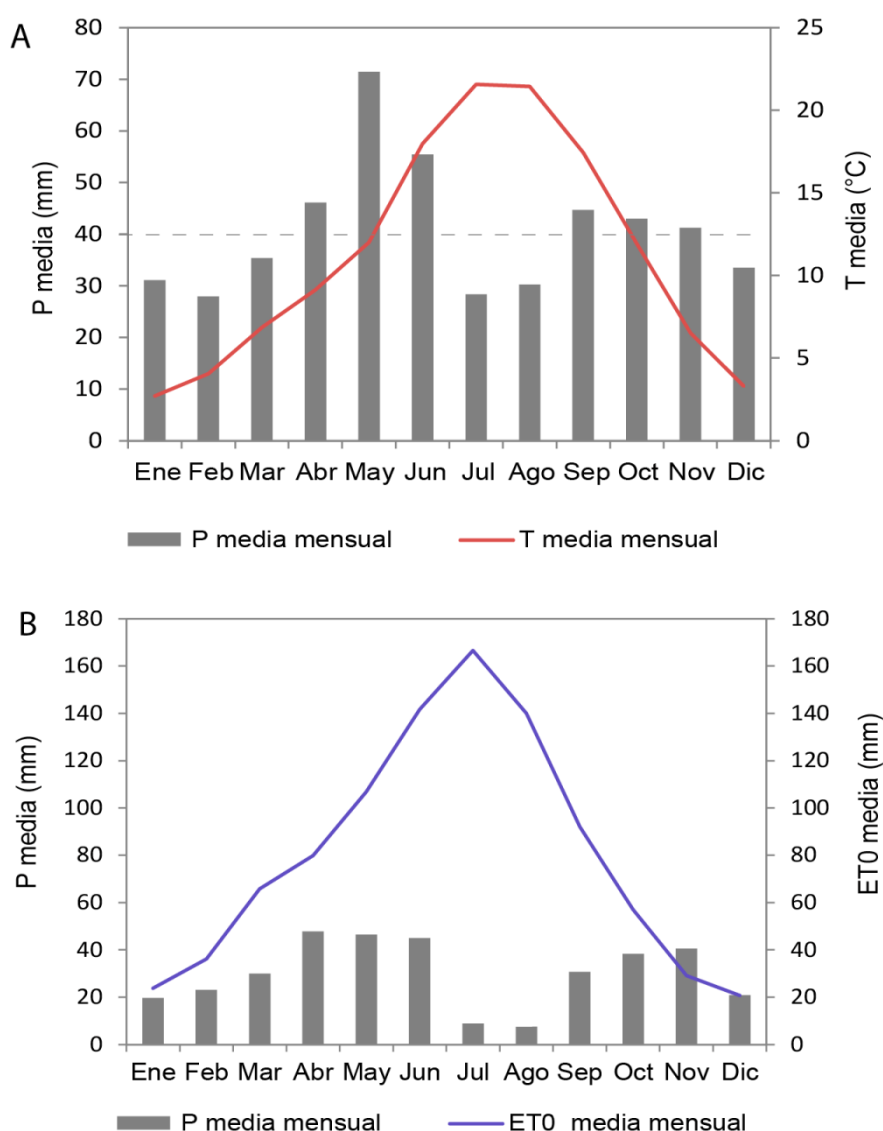


Figura 6. A) Diagrama ombrotérmico y precipitación media mensual, 40.3 mm (línea discontinua), en Tornos con datos de precipitación para el periodo 1974 - 2015 y de temperatura para el periodo 1969 - 2015. B) Precipitación media mensual y evapotranspiración mensual del periodo 2005 - 2014 de la estación de Daroca-SIAR.

3.3. Déficit hídrico, evapotranspiración y viento

El déficit hídrico anual, calculado con datos del periodo 2005 - 2014 de la estación automática Daroca-SIAR, como la diferencia entre evapotranspiración y precipitación, es 604.5 mm y varía entre 394 mm en 2008 y 798 mm en 2009. En julio se da el máximo déficit hídrico, con una media de 158 mm, y únicamente en los meses de noviembre y diciembre no se produce déficit hídrico (Figura 6B).

En la estación Los Picos, en la orilla de la laguna, el déficit hídrico anual es similar, 634.1 mm para el periodo 2002 - 2004, mientras que la evapotranspiración anual es

979.2 mm y supera los 1000 mm anuales en el año 2003 (García-Vera y Martínez-Cob, 2004). Dicha evapotranspiración se ve intensificada por el viento que alcanza una velocidad superior a 80 km h^{-1} en invierno. De acuerdo con la velocidad horaria del viento, Los Picos es la estación más ventosa de las analizadas por Martínez-Cob et al. (2010) en zonas regables de Aragón, siendo la dirección de viento más frecuente la NO o próximas en invierno y la SE o próximas en verano.

3.4. Régimen de temperatura y humedad del suelo

No hay estudios para determinar el régimen de humedad del suelo según criterios de Soil Taxonomy (SSS, 2014) por lo que se emplean datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas. Teniendo en cuenta el criterio para definir un año normal desde el punto de vista de las precipitaciones según Soil Taxonomy (SSS, 2014), el 59% de los años del periodo 1944 - 2014 son normales, es decir, la precipitación anual está dentro de los límites de la media \pm una desviación estándar (Figura 8C). El 21% de los años presentan una precipitación inferior al valor normal y el 18% presentan una precipitación superior.

Teniendo en cuenta la temperatura media anual, 11.2°C , y la diferencia entre la temperatura media del verano (20.3°C) y del invierno (3.3°C), 17°C , el régimen de temperatura del suelo es méxico. En general, el régimen de humedad del suelo es xérico excepto en suelos del fondo lacustre, orillas de la laguna y zonas palustres intermitentemente inundadas, donde se tiene un régimen de humedad ácuico. Este régimen también se da en fondos lacustres actualmente drenados para uso agrícola.

4. Presencia de lámina de agua en la laguna

Se ha llevado a cabo una síntesis de los datos disponibles sobre la presencia de agua en la laguna incluyendo datos directos e indirectos. Los datos directos, suministrados por CHE, consisten en las lecturas relativamente continuas (diarias o semanales) de altura de lámina de agua tomadas mediante prismáticos en escalas instaladas sucesivamente en diferentes lugares de la laguna desde 1974 (Figura 7). Los datos indirectos consisten en observaciones del estado de inundación de la laguna: periodos de aguas bajas, estados de sequía total, periodos de recuperación del nivel de agua, y de aguas altas, junto con datos ocasionales de nivel de agua, todo ello recopilado de trabajos previos (Aranzadi, 1980; Guiral, 1983; Gracia, 1990; Comín et al., 1990; Rodó et al., 2002; CHE, 2003; Pérez et al., 2009; Pérez-Bujarrabal, 2014).

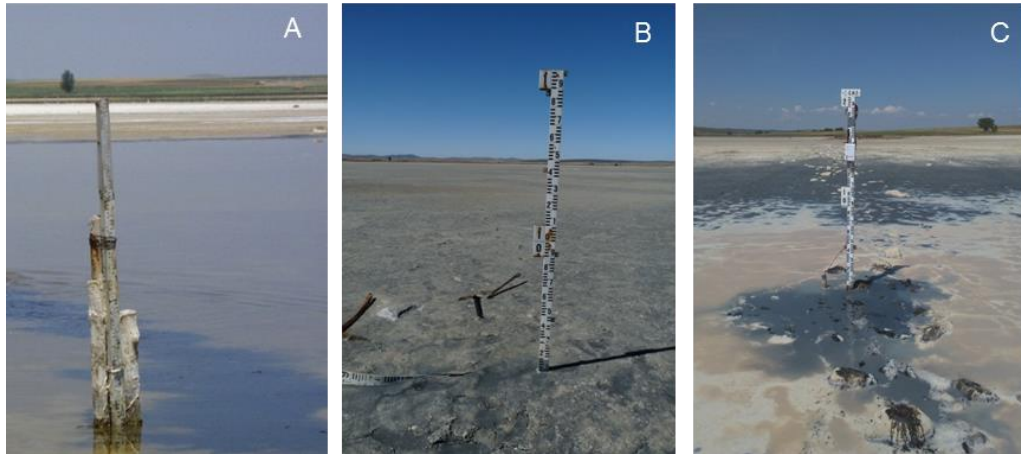


Figura 7. Escalas instaladas en la Laguna de Gallocanta para medir el nivel de la lámina de agua. A) Escala antigua junto a la estación Los Picos (Foto tomada el 10-06-2005 por C. Castañeda). B) Escala nueva instalada en la laguna en 2001 (Foto tomada el 31-08-2012 por C. Castañeda). C) Escala nueva instalada en 2016 junto a la estación Los Picos (Foto tomada por J. Causapé tras la instalación de la escala).

Los datos directos muestran un descenso generalizado del nivel de agua en la laguna, con un máximo de 2.84 m en mayo de 1974 (Pérez-Bujarrabal, 2014) y marcadas variaciones estacionales (Figura 8A). Desde entonces el nivel de agua en la laguna ha descendido alcanzando su total desecación en repetidas ocasiones, como la registrada en 1983 por CHE (2003) o las observaciones propias entre 2010 y 2016.

Tras el vaciado de la laguna en los años 1980 se discriminan cuatro periodos principales de inundación cuyo máximo varía entre 0.6 m y 1.1 m (Figura 8A). El periodo de inundación más notable corresponde al aumento del nivel de la lámina de agua desde 1986. La elevada precipitación anual ocurrida entre 1985 y 1990, 633 mm, permite que el nivel de agua de la laguna se mantenga hasta mediados de los años 1990. En los últimos años se observa un aumento de la magnitud de la oscilación del nivel de agua, alternando periodos en que la laguna está seca (2007 y 2012 - 2016) con episodios de inundación con el nivel de agua cercano a 1 m (en 2009).

La síntesis de los datos indirectos ha permitido identificar periodos de aguas altas y de aguas bajas consistentes entre las diferentes fuentes (Figura 8B). Se observan en la laguna tres periodos principales de aguas bajas (1944 - 1956; 1978 - 1986 y 1992 - 2008) separados por dos periodos de aguas altas (1960 - 1977 y 1987 - 1990). La precipitación anual media es 450 mm para los periodos de aguas bajas y 538 mm para los de aguas altas, lo que indica un 16% de diferencia. Previamente a 1944, Hernández-Pacheco (1926) destaca un periodo seco entre 1895 y 1898, con una lámina de agua rara vez por encima de los 2 m, y Dantín-Cereceda (1941) indica que la laguna está “menguada” porque no alcanza 1.5 m de profundidad de agua en 1940. En paralelo a la

figura anterior se muestra la distribución de años húmedos y secos obtenida en la sección anterior (2.3.4) para periodo 1944 - 2014 (Figura 8C). Se observa una mayor frecuencia de años húmedos (azul) entre 1970 y 1990, periodo que corresponde al mayor descenso de lámina de agua en la laguna.

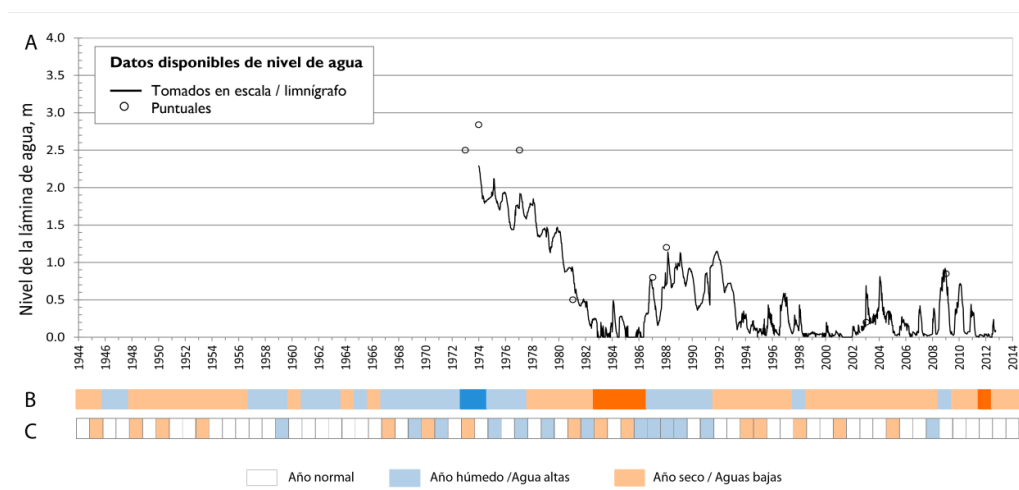


Figura 8. A) Nivel de la lámina de agua de la laguna desde 1974 hasta 2013. B) Síntesis de periodos históricos de aguas altas y aguas bajas en la laguna, con máximos de inundación y secado total señalados (máxima intensidad de color). C) Años normales, secos y húmedos según la precipitación anual (SSS, 2014) de Tornos desde 1944 hasta 2014.

Las variaciones de nivel de agua de la laguna reflejan no sólo las condiciones climáticas imperantes sino también las de periodos anteriores (Comín et al., 1990). La lámina de agua alcanza los niveles más altos entre marzo y junio, 0.61 m, mientras que los más bajos se registran de agosto a noviembre, 0.44 m, siendo la altura media 0.56 m. La máxima oscilación estacional registrada es 0.9 m en 2009, con 0.92 m en abril y 0.02 m en diciembre. En periodos de aguas altas se han observado oscilaciones estacionales de agua de 0.2 a 0.5 m, provocando cambios estacionales de composición química y de salinidad del agua (Comín et al., 1990).

5. Caracterización físico – química del agua freática y superficial

Las características físicas y químicas del agua freática (Anejo II) varían en función de la localización en el entorno de la laguna. La profundidad del agua freática alcanzada al abrir las calicatas varía entre 0.1 y 2.0 m y, en general, el freático es más superficial en el margen sur de la laguna que en el margen norte. Incluso en el fondo lagunar se ha observado esta diferencia entre los dos sitios muestreados, GA28 y GA29 (ver Capítulo

3, Figura 1). El pH oscila entre 6.3 (ligeramente ácida), en el fondo lagunar, y 8.5 (fuertemente alcalina) en zonas de la Reguera y la Lagunica (Figura 2), probablemente con influencia de agua dulce de escorrentía superficial y subsuperficial.

La salinidad del freático oscila entre 0.6 y 114 dS m⁻¹, siendo la del agua superficial 40 dS m⁻¹ (Anejo II). En zonas de cultivo se han encontrado freáticos no salinos a una profundidad media de 1.4 m y con una conductividad eléctrica (CE) media de 0.8 ± 0.1 dS m⁻¹. En el fondo lagunar, el agua freática hipersalina se ha alcanzado a una profundidad media de 0.75 m y tiene una CE media de 97 ± 26 dS m⁻¹. En zonas inundables de la periferia la salinidad media del freático disminuye, probablemente por la mezcla del freático salino con el agua dulce de escorrentía superficial y subsuperficial. Así, el agua freática de los Lagunazos y de las orillas (Figura 2) muestra la mitad y la tercera parte de la salinidad del fondo inundable actual, con CE media de 52.4 ± 43.4 dS m⁻¹ y 35.6 ± 23.1 dS m⁻¹, respectivamente. En las terrazas lacustres de los Lagunazos, la vegetación evidencia gran variabilidad de ambientes, salinos y no salinos. En la desembocadura de la Reguera (Figura 2) el agua es ligeramente salina (CE = 3 dS m⁻¹). No se ha encontrado relación entre la salinidad del agua freática y su profundidad, siendo ésta muy variable según se desprende de nuestras observaciones en las calicatas abiertas durante la estación seca (agosto a octubre).

Se diferencian tres tipos de agua freática según su composición aniónica. Las aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas tienen un 55 - 90% de bicarbonato y menos del 20% de Cl⁻ (Figura 9). Se localizan en el extremo SE de la laguna, en Los Lagunazos y la Lagunica, alejadas del fondo actual. Del mismo tipo son las aguas procedentes de arroyos (Aranzadi, 1980) y la mayoría de las aguas subterráneas procedentes de sondeos, pozos y piezómetros muestreadas por CHE (2003) en el año 2000 a profundidades entre 3 y 100 m. El segundo tipo son las aguas clorurado-sulfatadas cálcico-magnésicas con concentración de bicarbonato intermedia, 30 - 35% (Figura 9) y que se encuentran en la zona de la Reguera. El tercer tipo son las aguas clorurado-sulfatadas con poco bicarbonato (<10%) y alta concentración de Cl⁻ (50 - 80%). Estas aguas son muy salinas, y muestran un enriquecimiento en sodio hacia los fondos, dando una composición similar a la del agua superficial de la laguna.

El agua superficial de la laguna pertenece al tipo clorurado-sulfatado, como el agua superficial durante periodos históricos de aguas altas (Aranzadi, 1980, Comín et al., 1990). Las aguas freáticas salinas de los fondos y terrazas bajas muestran un valor medio del cociente Mg/Ca (meq L⁻¹) de 27, que quintuplica la obtenida por Aranzadi (1980) en el agua superficial de la laguna.

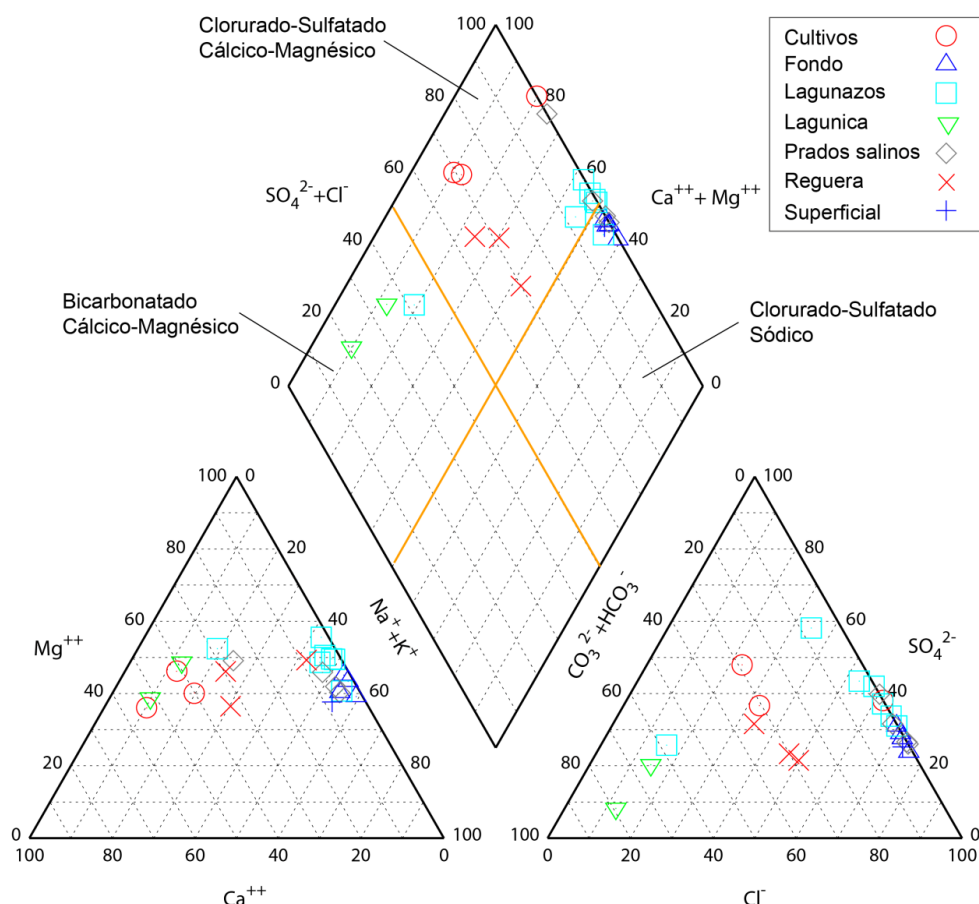


Figura 9. Diagrama Piper con los tipos de agua freática y superficial en las diferentes zonas de muestreo de la Laguna de Gallocanta.

En el entorno de la laguna la concentración de iones en el agua freática varía más de tres órdenes de magnitud, especialmente el cloruro, sulfato, sodio y magnesio (Figura 10), dependiendo de su localización. En zonas de cultivo el agua freática presenta la concentración más baja de sodio y bicarbonatos. En la Lagunica (Figura 2), con composición similar, se observa un ligero incremento de bicarbonato y en la Reguera las aguas muestran mayor concentración iónica que en zonas de cultivo.

El agua superficial de la laguna tiene una concentración de iones similar al agua subterránea de los prados salinos y del fondo lagunar. En estas posiciones topográficamente bajas, la concentración de iones es la más alta de las muestras estudiadas, con valores máximos de sodio, magnesio, cloruro y sulfato (Figura 10) y poco bicarbonato. En los Lagunazos las aguas freáticas muestran gran variabilidad en cuanto a su concentración iónica lo que se refleja en una gran diversidad de ambientes. Las terrazas más bajas tienen mayor concentración de iones, siendo el sodio y cloruro entre 300 - 400 veces mayor que en las terrazas altas.

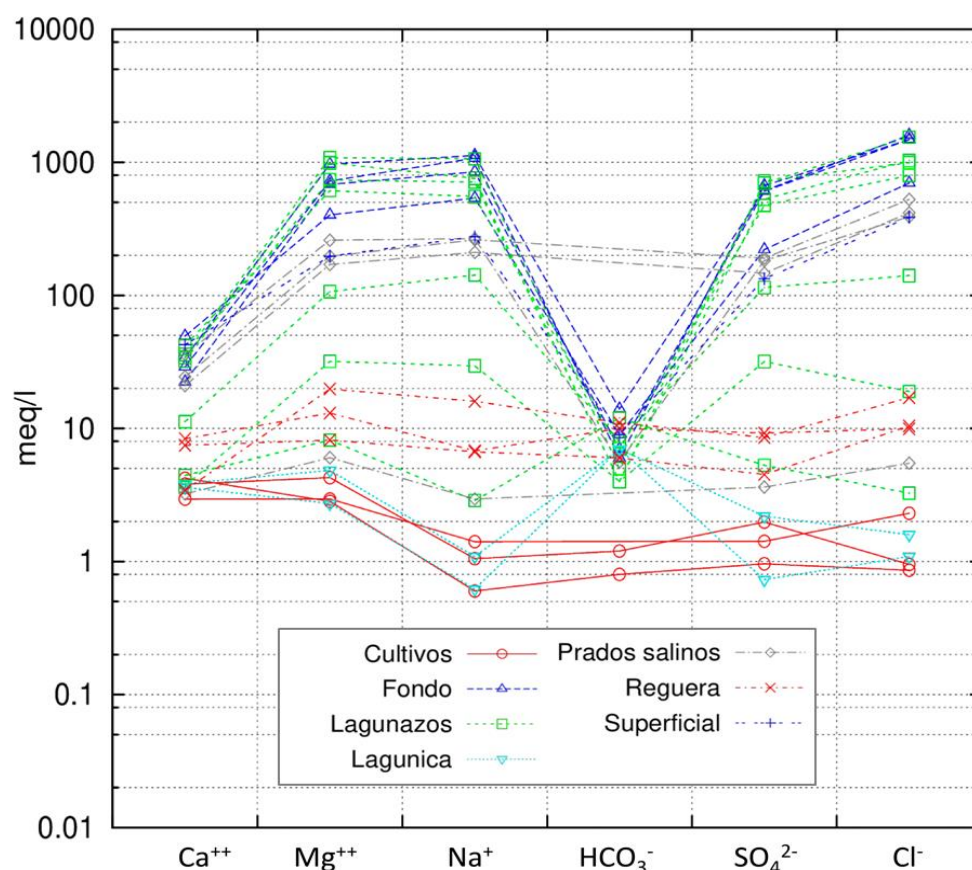


Figura 10. Diagrama Schoeller-Berkaloff de las aguas subterráneas y superficial de la Laguna de Gallocanta.

El agua freática frecuentemente supera el contenido máximo de nitrato (50 mg L^{-1}) que regula su potabilidad, especialmente en los prados salinos y cultivos del margen sur de la laguna, siendo máximo en la zona que conecta la laguna con los Lagunazos (Figura 2), donde se alcanzan valores de 0.4 a 4 g L^{-1} . Las condiciones de reducción del suelo favorecen la presencia de amonio en el freático del fondo lagunar y en la orilla sur, 20.6 y 7.9 mg L^{-1} , respectivamente (Anejo II).

6. Distribución de vegetación natural

La distribución de vegetación en el entorno lagunar está condicionada principalmente por su tolerancia a la inundación y a la salinidad edáfica. Gómez et al. (1983) distingue varios grupos de vegetación en la cuenca de la Laguna de Gallocanta: las comunidades de robledales (*Quercus pyrenaica*) y quejigales (*Q. faginea*) en suelos ácidos, los carrascales (*Q. ilex* subsp. *ballota*) sobre calizas o suelos básico-neutros, y la vegetación de ribera y zonas húmedas con carrizales, saladares, juncuales y pastos no halófilos. En las orillas de la laguna, las comunidades vegetales se disponen en orlas alrededor de la lámina de agua (Figura 11). La vegetación de los suelos salinos está

constituida por *Salicornia ramosissima* y *Suaeda maritima* (Gómez et al., 1983). Son especies capaces de desarrollarse en terrenos muy salinos y húmedos, variando su distribución según la oscilación del nivel de agua en la laguna. Entre los juncuales de *Juncus maritimus* y los saladares de *Salicornia* sp., aparecen orlas de *Puccinellia fasciculata* que es sustituida por *P. pungens* en condiciones más secas, siendo esta última una especie endémica de la Laguna de Gallocanta, catalogada como “vulnerable” en la lista roja de especies amenazadas por su restringida distribución (Moreno, 2013).

En espacios y condiciones intermedias entre las zonas salinas y no salinas se distribuyen en mosaico especies como *Schoenus nigricans*, *Frankenia laevis* y *Limonium* sp., esta última forma parte del hábitat prioritario 1510 (Estepas salinas mediterráneas) de la Directiva Hábitats. En zonas donde se acumula el agua dulce, y en los arroyos, se desarrollan carrizales altos y densos y los prados pastados. Los carrizales están formados por *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *T. latifolia* y *Scirpus lacustris*. Los prados incluyen *Trifolium fragiferum* y *Cynodon dactylon*, juncuales de *Eleocharis palustris*, *Scirpus holoschoenus*, y *Juncus articulatus*, entre otras especies. En periodos de aguas altas se desarrollan importantes poblaciones de macrófitos sumergidos como *Ruppia drepanensis* en zonas someras y *Lamprothamnium papilosum* en zonas más profundas (Comín et al., 1993).

Siguiendo las toposecuencias, margen norte y sur y los Lagunazos, estudiadas en la presente Tesis se tiene la siguiente distribución de vegetación. En la orilla sur de la laguna (Figura 11A) la escasa pendiente favorece la formación de orlas de vegetación que colonizan las diferentes formas costeras, y que incluyen praderas de *Salicornia patula*, *Puccinellia pungens* y *Limonium costae*, y praderas compuestas por diferentes especies de *Juncus*. *Bolboschoenus maritimus* se desarrolla en las zonas más cercanas a los cultivos. En el margen norte (Figura 11B), la zona más salina presenta *Aeluropus littoralis*, *Suaeda splendens*, *S. spicata*, *Salicornia patula*, *Sphenopus divaricatus* y *Limonium costae*, mientras que donde el agua freática es no salina, en los abanicos de la sierra, se aprovechan los suelos para cultivo, especialmente girasol ya que los suelos aún conservan algo de humedad.

En las terrazas lacustres de los Lagunazos (Figuras 2 y 11C), las pequeñas variaciones topográficas y la mezcla de agua subterránea salina y agua dulce superficial ha propiciado el desarrollo de una gran variedad de hábitats. Además, la inundación ocasional o intermitente de la zona ha favorecido la conservación de hábitats protegidos. Las zonas más bajas suelen estar desprovistas de vegetación o colonizadas por halófitos anuales o perennes, algunos protegidos como *Limonium* sp. o *Puccinellia pungens* (Figuras 11A y 11C).

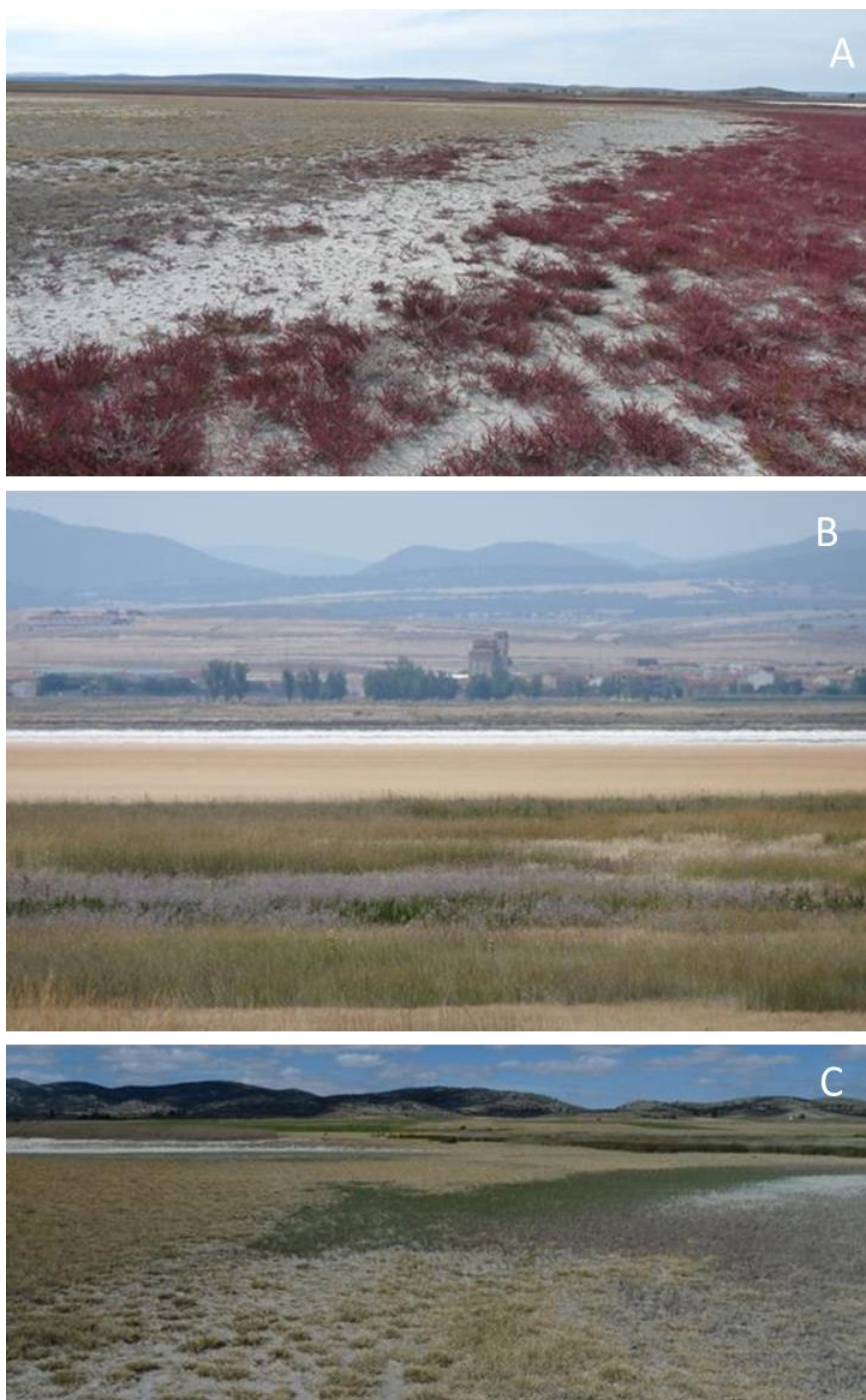


Figura 11. Orlas de vegetación natural en zonas húmedas de la Laguna de Gallocanta. A) Vista de la orilla sur hacia Las Cuerlas, con orlas de *Salicornia* sp. (rojizo) junto a la playa, suelo desnudo, y praderas de *Puccinellia pungens* tierra adentro. B) Vista desde la orilla norte hacia Bello, con la laguna seca (marrón) y con acumulación de sales (blanco). C) Praderas de *Puccinellia pungens* y *Limonium* sp., en las terrazas intermedias de los Lagunazos, junto al extremo SE del fondo lagunar (arriba a la izquierda en color blanco).



CAPÍTULO 3.

Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos han sido necesarios los trabajos de gabinete, campo y laboratorio que se explican a continuación de forma sintética.

1. Trabajos de gabinete

Previamente al trabajo de campo se ha llevado a cabo la fotointerpretación estereoscópica de contactos de fotografías aéreas correspondientes a los vuelos USAF-B (1956 - 1957) a escala 1:33 000, y PNOA (2006), de escala original aproximada 1:30 000 e impreso a escala 1:15 000. Se han identificado unidades geomórficas que sirven de criterio para la selección de los sitios de muestreo. Para analizar la topografía se ha empleado el modelo digital del terreno (MDT) del IGN (Instituto Geográfico Nacional) obtenido a partir del vuelo LiDAR de alta resolución vertical, 0.2 m, del año 2010.

Se han recopilado documentos cartográficos de diversas fuentes, en formato papel y digital, incluyendo fotografías aéreas escaneadas, ortofotos, mapas geológicos y topográficos, e información territorial diversa que se resume en la Tabla 1. La información ráster y vectorial se ha editado y analizado mediante el sistema de información geográfica ArcGIS® v.10.3 (Esri España Soluciones Geoespaciales S.L., Spain) y el programa ENVI® v. 5.2 (Harris Geospatial Solutions, Melbourne, FL, USA). En campo se ha empleado el GPS GeoExplorer 2008 Series para localizar los puntos de muestreo y para verificar la cartografía geomorfológica.

Tabla 1. Síntesis de la información del territorio empleada para el análisis de la zona de estudio.

	Documentos	Fecha	Escala/resolución
	Vuelo USAF-B	1956-1957	1:33 000
Fotografías aéreas	Vuelo PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea)	2006	1:30 000
Ortofotos	PNOA	2006, 2009 y 2012	0.5 m / píxel
MDT	MDT05-LiDAR	2010	0.5 m / píxel
Mapa Geológico de España serie MAGNA	Hoja 490 (Odón)	1983	1:50 000
	Hoja 491 (Calamocha)	1983	1:50 000
	Delimitación de la Reserva Natural Dirigida	2006	1:25 000
Cartografía temática y administrativa	Parcelario SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas)	2013, 2014 y 2015	
	Red hidrográfica, núcleos de población y límites administrativos	1995/2000	1:50 000

2. Trabajos de campo

A partir de criterios geomorfológicos, topográficos, y las observaciones de campo de la distribución de la vegetación, las zonas salinas y la humedad del suelo, se ha llevado a cabo el estudio de suelos en el entorno de la Laguna de Gallocanta. Las prospecciones de suelos incluyen suelos salinos y no salinos, de vegetación natural y de cultivo, y se agrupan en tres prospecciones principales (Figura 1 y Tabla 2), llevadas a cabo en el periodo de 2010 a 2015: 1) Perfiles de suelo; 2) Estudio de las condiciones de reducción y 3) Fertilidad del ecosistema suelo-planta.

2.1. Perfiles de suelo

Los perfiles de suelo, estudiados mediante la apertura de un total de 20 calicatas (Tabla 2 y Anejo III) y sondeos, alcanzan una profundidad comprendida entre 90 y 350 cm. Se han muestreado sistemáticamente los horizontes identificados, y se han descrito siguiendo el Sistema de información edafológica y agronómica de España (SINEDARES, 1983) y el libro de campo de Schoeneberger et al. (2012). Para clasificar el suelo se ha empleado Soil Taxonomy (SSS, 2014). Se han tomado muestras de todos los horizontes del suelo para análisis físicos y químicos de la tierra fina, y también se han tomado muestras inalteradas de horizontes seleccionados para fabricar láminas delgadas para

su observación al microscopio. Cuando apareció agua freática, ésta se muestreó para su posterior análisis en laboratorio.

La prospección de campo para estudiar los perfiles de suelo, se ha organizado en dos partes correspondientes a los objetivos 1 y 2, y son los que se incluyen en esta Tesis:

- Identificar rasgos edáficos en un gradiente de humedad y salinidad edáfica que abarca suelos desde los cultivos hasta la laguna. Se han estudiado 11 perfiles de suelo localizados en dos transectos situados en los márgenes norte, 6 perfiles, y sur de la laguna, 5 perfiles (Figura 1).
- Identificar procesos de edafización de terrazas lacustres recientes formadas en la zona palustre situada a sotavento de la laguna. Los 9 perfiles se sitúan a lo largo de dos transectos, uno paralelo y otro perpendicular a la dirección del viento dominante, NO - SE (Figura 1).

De forma complementaria se han estudiado 13 perfiles de suelo (Figura 1) en diferentes unidades geomórficas del entorno lagunar incluyendo suelos de abanicos aluviales al norte y sur de la laguna, cordones y barreras arenosas, y suelos al pie de la sierra Santa Cruz - Valdelacasa cuya descripción macromorfológica y los correspondientes datos analíticos se incluyen en los Anejos III y IV, respectivamente. También se incluye una muestra de agua freática en superficie en la zona de la Reguera GA50 (Figura 1 y Anejo II).

2.2. Condiciones de reducción del suelo

La reducción del suelo es un aspecto edáfico relevante en el entorno lacustre dado el régimen fluctuante de la laguna. Se han instalado tubos IRIS (Indicator of Reduction In Soils) (Figura 2A) para cuantificar el grado de movilización de hierro en el suelo, método desarrollado por Jenkinson and Franzmeier (2006) y aceptado como un método standard para identificar condiciones de reducción en suelos en EEUU (Raberhorst, 2012). Se han seleccionado cinco puntos en diferentes unidades geomórfológicas (Figura 1 y Tabla 2): fondo lagunar, barrera arenosa, depósitos areno-limosos sumergidos, y terrazas lacustres a sotavento y barlovento, representativas de diferentes ambientes de salinidad e inundación.

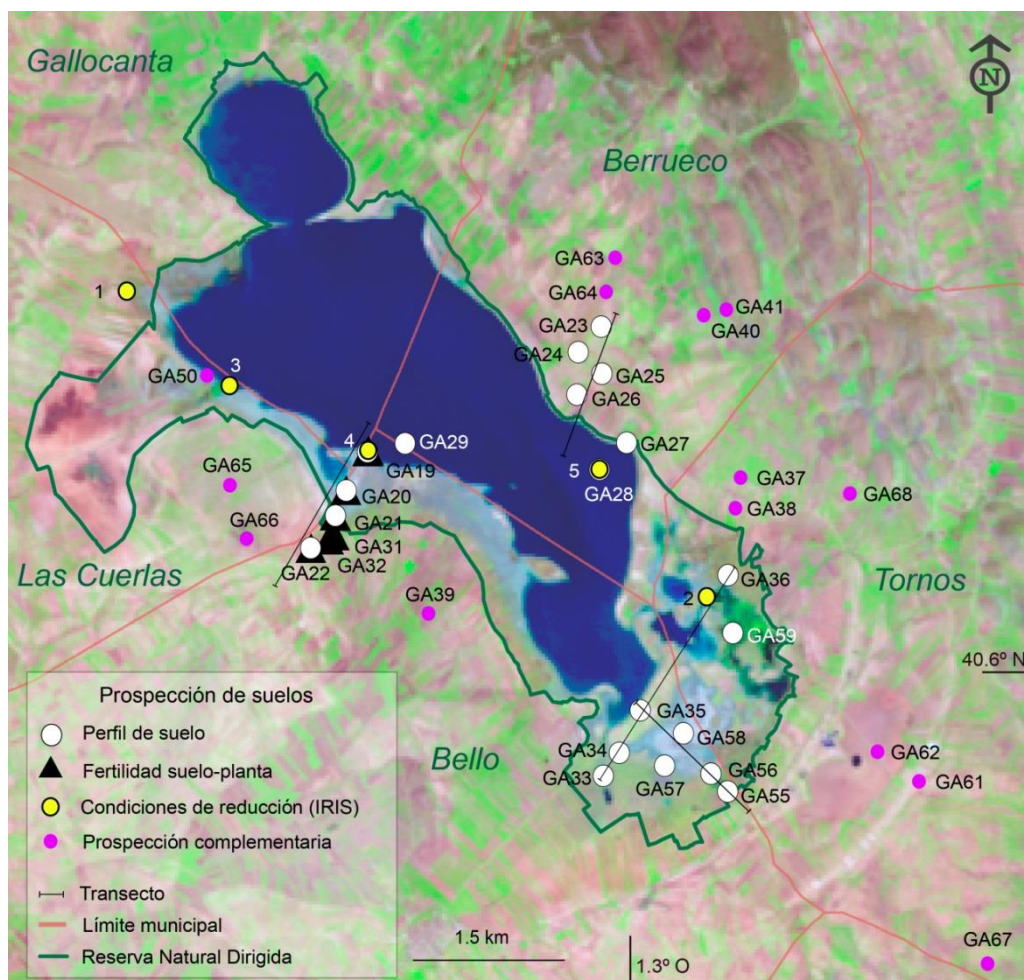


Figura 1. Localización de los suelos estudiados en el entorno de la Laguna de Gallocanta (azul) entre 2010 y 2015, mostrados sobre una imagen Landsat 5TM en falso color (RGB 543) tomada en abril de 1987.

2.3. Fertilidad del ecosistema suelo-planta

Por ser un aspecto de interés desde el punto de vista agrícola, la fertilidad del ecosistema suelo-planta se ha estudiado en un gradiente de salinidad edáfica. Se han prospectado seis puntos a lo largo de un transecto desde el cultivo hasta el borde de la laguna (Figura 1 y Tabla 2). Para un análisis comparativo en un gradiente de aridez en el valle del Ebro, se ha replicado este estudio en la salada de Guallar (Bujaraloz, Zaragoza), donde se han prospectado tres puntos (Tabla 2). Se estudian suelos de vegetación halófila y de cultivo, tomando muestras de suelo de 0 a 5 cm y de 0 a 25 cm de profundidad, respectivamente, así como muestras de la parte aérea de la vegetación (Figura 2B y 2C).

Tabla 2. Fecha de muestreo, localización y altitud de los sitios muestreados en la Laguna de Gallocanta. Ver Figura 1 para localización y tipo de muestreo. (*Prospección complementaria).

Sitio	Fecha de muestreo	Municipio, provincia	UTM-X	UTM-Y	Altitud, m LIDAR, MDE
GA19	23/10/2010	Bello, Teruel	625801.55	4535762.75	992.4
GA20	23/10/2010	Bello, Teruel	625589.86	4535402.29	992.5
GA21	23/10/2010	Bello, Teruel	625482.18	4535163.42	993.7
GA22	23/10/2010	Bello, Teruel	625244.52	4534865.72	995.5
GA23	27/07/2011	Berrueco, Zaragoza	628112.97	4536927.80	1007.6
GA24	27/07/2011	Berrueco, Zaragoza	627880.55	4536691.35	1001.4
GA25	27/07/2011	Berrueco, Zaragoza	628117.26	4536489.10	997.5
GA26	28/07/2011	Berrueco, Zaragoza	627870.04	4536293.09	993.8
GA27	28/07/2011	Berrueco, Zaragoza	628361.82	4535842.42	993.1
GA28-IRIS (Punto 5)	01/09/2011	Berrueco, Zaragoza	628096.32	4535598.28	991.7
GA29	02/09/2011	Tornos, Teruel	626172.53	4535840.01	991.6
GA30-IRIS (Punto 4)	09/04/2013	Bello, Teruel	625807.20	4535773.59	992.1
GA31	2013/2014/2015	Bello, Teruel	625576.89	4535187.98	994.7
GA32	2013/2014/2015	Bello, Teruel	625520.30	4535151.53	995.2
GA33	31/05/2013	Bello, Teruel	628130.93	4532741.83	993.8
GA34	31/05/2013	Bello, Teruel	628291.26	4532955.18	993.2
GA35	02/07/2013	Bello, Teruel	628496.42	4533350.54	994.5
GA36	03/07/2013	Tornos, Teruel	629364.69	4534611.93	994.2
GA37*	01/08/2013	Tornos, Teruel	629489.78	4535517.70	1003.4
GA38*	01/08/2013	Tornos, Teruel	629436.63	4535237.65	997.7
GA39*	01/08/2013	Bello, Teruel	626405.83	4534259.08	996.6
GA40*	02/08/2013	Berrueco, Zaragoza	629124.30	4537033.94	1025.0
GA41*	02/08/2013	Berrueco, Zaragoza	629346.82	4537083.17	1033.3
GA48-IRIS (Punto 2)	16/04/2014	Tornos, Teruel	629151.94	4534410.03	992.9
GA50*	11/07/2014	Las Cuerlas, Zaragoza	624314.73	4536458.68	991.9
GA53-IRIS (Punto 3)	11/07/2014	Las Cuerlas, Zaragoza	624439.96	4536375.23	992.4
GA54-IRIS (Punto 1)	17/07/2014	Las Cuerlas, Zaragoza	623422.30	4537259.53	994.0

Tabla 2. (cont.) Fecha de muestreo, localización y altitud de los sitios muestreados en la Laguna de Gallocanta. Ver Figura 1 para localización y tipo de muestreo. (*Prospección complementaria).

Sitio	Fecha de muestreo	Municipio, provincia	UTM-X	UTM-Y	Altitud, m LIDAR, MDE
GA55	08/08/2014	Bello, Teruel	629360.42	4532595.43	995.2
GA56	07/08/2014	Bello, Teruel	629191.59	4532761.88	994.8
GA57	06/08/2014	Bello, Teruel	628739.56	4532838.52	994.0
GA58	07/08/2014	Bello, Teruel	628921.77	4533138.49	992.9
GA59	06/08/2014	Tornos, Teruel	629415.01	4534070.28	993.6
GA61*	17/02/2015	Tornos, Teruel	631249.42	4532691.06	1004.2
GA62*	18/02/2015	Tornos, Teruel	630845.28	4532967.85	997.8
GA63*	09/07/2015	Berrueco, Zaragoza	628355.51	4537781.41	1020.6
GA64*	09/07/2015	Berrueco, Zaragoza	628269.99	4537461.55	1013.2
GA65*	08/07/2015	Las Cuerlas, Zaragoza	624555.62	4535658.09	997.3
GA66*	08/07/2015	Las Cuerlas, Zaragoza	624716.67	4535162.00	998.5
GA67*	10/09/2015	Tornos, Teruel	632035.90	4531202.84	1009.6
GA68*	10/09/2015	Tornos, Teruel	630677.14	4535579.59	1005.8
GLR3	2013/2014/2015	Bujaraloz, Zaragoza	732022.05	4587839.05	336.5
GLR6	2013/2014/2015	Bujaraloz, Zaragoza	732150.89	4587721.41	339.4
GLR7	2013/2014/2015	Bujaraloz, Zaragoza	732092.08	4587783.03	338.0



Figura 2. Ejemplos de trabajos de campo. A) Instalación de un tubo IRIS en la orilla sur (GA30). B) Muestreo de los primeros 5 cm de suelo en praderas de *Puccinellia* sp. y C) muestreo de los primeros 25 cm de suelo y de cereal (trigo) para el estudio de la fertilidad del ecosistema suelo-planta.

3. Análisis de muestras de suelo y agua

Los análisis de las muestras de suelo (Anejo IV) fueron llevados a cabo en el laboratorio de la EEAD (CSIC) y en los siguientes laboratorios externos: Instituto Pirenaico de Ecología (IPE - CSIC); Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón; Laboratoire d'analyses des sols del Instituto Nacional de Investigación Agronómica, INRA

(Arras, Francia); y laboratorio del Departamento Environnement et Agronomie, INRA (Toulouse, Francia) e incluyen:

- Secado al aire y posterior tamizado a tamaño 2 mm con molino de barras.
- Prueba previa de pH en el extracto suelo:agua 1:2.5 (pH1:2.5), y de salinidad mediante medida de la conductividad eléctrica (CE) en los extractos suelo:agua 1:5 (CE1:5) y suelo:agua 1:10 (CE1:10), en dS m^{-1} a 25°C.
- Distribución del tamaño partícula (arena, limo y arcilla) mediante difracción láser con la corrección para el valor de la arcilla (Taubner et al., 2009) para su posterior clasificación textural USDA.
- Pasta saturada (Figura 3A y 3B) para determinar: pH en la pasta (pH_p); y salinidad (conductividad eléctrica del extracto, CEe).
- El análisis químico de tierra fina incluye:
 - Yeso, por el método de termogravimetría (Artieda et al., 2006) y confirmado con el test cualitativo (Van Reeuwijk, 2002) para contenidos de yeso <2%.
 - Carbonato cálcico equivalente (CCE), determinado por gasometría con el calcímetro de Bernard (MAPA, 1994).
 - Materia orgánica (MO), determinada por digestión con dicromato (Heanes, 1984) y espectrofotometría (UV/V UNICAM 8625).
 - Nitrógeno total, determinado por combustión seca (ISO 10694 e ISO 13878).
 - Fósforo total, determinado por calcinación y digestión húmeda por ICP (Plasma de acoplamiento inductivo) y el fósforo disponible para las plantas, determinado por el método Olsen et al. (1954).
 - Capacidad de intercambio catiónico determinada por ICP-OES (Plasma de acoplamiento inductivo-espectrofotómetro de emisión óptico).

Los análisis de muestra vegetal se llevaron a cabo durante la estancia predoctoral en el laboratorio del Departamento “Environnement et Agronomie” del INRA (Toulouse, Francia) e incluyen:

- Nitrógeno total por combustión seca con analizador CN gas (Elementar Vario Cube).
- Fósforo total por digestión con H_2SO_4 - H_2O_2 con el método colorimétrico (Figura 3C y 3D) verde malaquita y espectrometría siguiendo a Van Veldhoven y Mannaerts (1987).

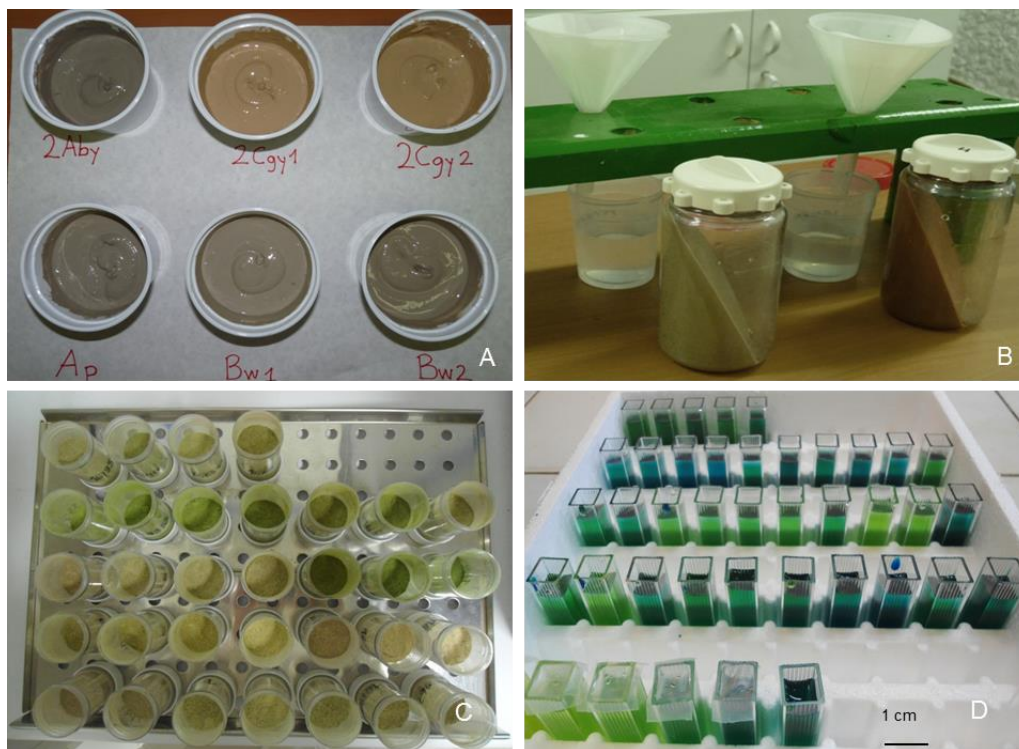


Figura 3. Ejemplos de trabajo de laboratorio. A) Pastas saturadas obtenidas para los diferentes horizontes del perfil GA35. B) Filtrado del extracto obtenido de la pasta saturada para medir CE. C) Secado en estufa de muestras vegetales y D) Muestras vegetales en celdas de 1 cm de ancho tras la adición de verde malaquita para su análisis colorimétrico por espectrometría.

Se ha caracterizado, además del suelo, el agua freática (alcanzada al abrir calicatas y en sondeos, y en los descritos para caracterizar los sitios de instalación de tubos IRIS), y el agua superficial de la laguna en la orilla sur (GA30) durante el muestreo para fertilidad en abril de 2013. La profundidad de las muestras de agua freática varía entre 0 y 2 m. Las 24 muestras de agua totales muestreadas (Anejo II) representan diferentes zonas del entorno de la laguna: fondo lagunar, orillas y prados salinos, zonas inundables en periodos de aguas altas, antiguos fondos lacustres drenados para cultivo (Lagunazos en Figura 2 del Capítulo 2), y cultivos hasta una distancia de 3 km desde la orilla. Los análisis de todas las muestras de agua incluyen: pH y conductividad eléctrica (CE), e iones mayores por cromatografía iónica con supresor químico (APHA, 1989) y se encuentran recogidos en el Anejo II.

4. Fabricación de láminas delgadas

El muestreo de suelo para el estudio de micromorfología consistió en la extracción de bloques no perturbados de suelo de horizontes seleccionados. En campo se trazó una marca de orientación en los bloques de suelo extraídos, y una vez en laboratorio, se dejaron secar a temperatura ambiente durante una semana, tras la cual se terminaron de secar en estufa, siempre a una temperatura inferior a 40°C debido a la presencia de yeso en algunos bloques.

Una vez secos se impregnaron con resina de poliéster en frío y se curaron a temperatura ambiente durante un mínimo de dos semanas. Cada bloque se cortó con sierra circular de diamante (Figura 4A) y la pastilla obtenida se pegó sobre un portaobjetos de vidrio para su desbaste hasta 30 μm de espesor (Figuras 4B y 4C). Se prepararon láminas delgadas (135 x 58 mm y 58 x 42 mm) de acuerdo con los métodos descritos en Guillore (1985), y se estudiaron y describieron en microscopio siguiendo la metodología de Stoops (2003). Todo el proceso completo se llevó a cabo en el Laboratorio de Micromorfología de la EEAD.

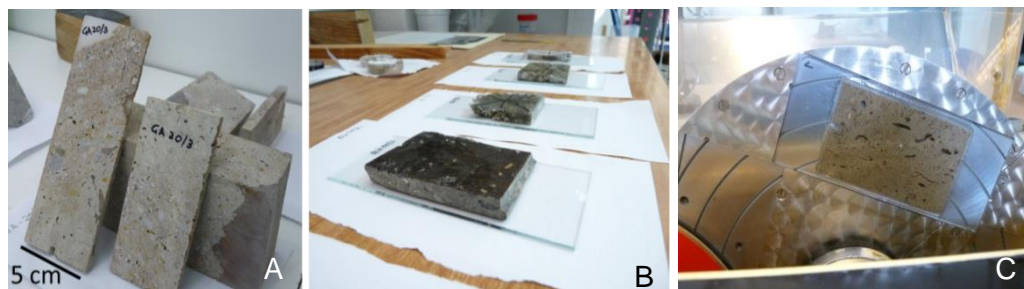


Figura 4. Elaboración de láminas delgadas. A) Pastilla de 5 cm de ancho obtenida tras el corte de un bloque impregnado. B) Pegado de la pastilla en un portaobjetos para su posterior desbaste. C) Desbaste en rectificadora hasta obtener la lámina delgada de 30 μm de espesor.

5. Cálculos posteriores

Para comparar la composición del suelo de los diferentes perfiles se calcularon proporciones de CE, CCE, yeso, MO, arena, limo, y arcilla, a intervalos de 25 cm de profundidad. Los valores obtenidos son una media ponderada por el espesor del horizonte, que se calcula con el programa SLICES (Synthetic Layers integrating characteristics Enclosed in the Soil), accesible en:

<http://digital.csic.es/handle/10261/60892>.



CAPÍTULO 4.

Edaphic and geomorphic evidences of water level fluctuations in Gallocanta Lake, NE Spain

Edaphic and geomorphic evidences of water level fluctuations in Gallocanta Lake, NE Spain

Resumen

La relación entre las fluctuaciones del nivel de la lámina de agua de la laguna y la edafogénesis es compleja, especialmente en los márgenes de la laguna, donde las condiciones topográficas, hidrológicas y sedimentarias son más variables. Las fluctuaciones generan elementos del paisaje que proporcionan información sobre los procesos involucrados en el desarrollo del suelo y sobre la extensión de las zonas afectadas por inundación y desecación. La información conjunta de inspecciones geomorfológicas detalladas en el campo, de la cartografía de las orillas de la laguna y de la edafogénesis de cada elemento del paisaje proporciona un conocimiento más profundo de estas relaciones. Esta metodología ha sido utilizada para estudiar la Laguna de Gallocanta, humedal salino localizado al NE de España, cuyas fluctuaciones del nivel del agua son importantes y rápidas.

La clasificación de las formas sedimentarias y de los ambientes litorales de los márgenes de la laguna sirvieron como criterio para el posterior muestreo del suelo. El estudio geomorfológico ha revelado una gran diversidad y contraste en el entorno de los márgenes desde las orillas afectadas por la erosión costera hasta las zonas caracterizadas por la sedimentación. Se han estudiado los suelos de dos toposecuencias en los dos márgenes de la laguna incluyendo 11 pediones que se encontraban en diferentes unidades geomórficas.

Tomando como criterios los gradientes geomorfológicos, y de humedad y salinidad edáfica, los suelos estudiados muestran una sucesión de Inceptisoles a Aridisoles, con Mollisoles desarrollados en posiciones intermedias y suelos ácuicos en fondo de la laguna y la orilla sur. Los suelos tienen una textura arenosa y limosa y una composición predominantemente carbonática, con una alta variación en carbonato cálcico equivalente (CCE media = 37%), de textura y de elementos gruesos a lo largo de los perfiles del suelo.

La salinidad del suelo es más alta en las zonas más bajas y en los horizontes superiores, donde la ECe (conductividad eléctrica del extracto) media es 188.6 dS m⁻¹ a 25 °C. El mayor contenido de materia orgánica (6%) y yeso (34%) se produce en el suelo

del fondo de laguna. Las características como el color de la matriz del suelo y el movimiento de Fe y Mn indican cambios redox asociados con la saturación de agua en el suelo bajo condiciones carbonatadas y/o salinas.

Las características macro y micromorfológicas de los horizontes oxidados y reducidos indican la alternancia de eventos palustres (reducidos) y no palustres (detriticos, emergidos, oxidados) en diferentes posiciones geomórficas y topográficas, desde el fondo de la laguna hasta 7 m por encima del mismo. La edafogénesis y las formas litorales localizadas en áreas actualmente emergidas confirman la tendencia pasada y presente hacia la desecación de la laguna. Este estudio ha mejorado nuestra comprensión de cómo se han formado los suelos y cómo se han desarrollado en las diferentes unidades geomórficas. Este estudio sirve como base para gestionar el uso del suelo en la reserva natural protegida y en el entorno agrícola de la laguna.

Este capítulo se ha publicado en la revista *Geoderma*. IF (2015): 2.855 (6/34 *Soil Science*).

Castañeda, C., Gracia, F.J., **Luna, E.**, Rodríguez, R., 2015. Edaphic and geomorphic evidences of water level fluctuations in Gallocanta Lake, NE Spain. *Geoderma* 239-240, 265-279.

Abstract

The pedological implications of lake water level fluctuations are complex, especially in lake margin, where topographical, hydrological, and sedimentary conditions are most variable. Lake water level fluctuations generate landscape elements, which provide insights into the processes involved in soil development and the extent of the zones affected by flooding/desiccation. Coupling information from detailed geomorphological inspections in the field, the mapping of the lakeshore, and the pedogenesis of each landscape element can provide a better understanding of these relationships, which was used to study the saline Gallocanta Lake, NE Spain, a semiarid intramontane lacustrine system that undergoes significant and rapid water level fluctuations. Geomorphic classification of the lake margin forms and environments served as a guide for soil sampling. The geomorphological survey revealed high diversity and contrast in the lake margin environment, from shores affected by coastal erosion to zones characterized by progradation/aggradation. Two soil toposequences and 11 pedons that were on different geomorphic units were studied on two margins of the lake.

Following gradients in elevation, moisture, and salinity, soils showed a succession of Inceptisols to Aridisols, with Mollisols developed at intermediate positions and Aquic soils at the lake floor and southern shore. Soils had a sandy, loamy texture and a

predominantly carbonatic composition, high variation in CCE (mean = 37%), texture, and coarse fragments throughout the soil profiles. Soil salinity was highest at the lowest topographic position and in the upper soil horizons, where mean $E_{Ce} = 188.6 \text{ dS m}^{-1}$ at 25 °C. In addition, the highest organic matter (6%) and gypsum (34%) content occurred at the lake floor. Soil color characteristics and concentrations, and depletions of Fe and Mn indicated redox changes associated with soil water saturation under carbonate and or saline conditions. Macro and micromorphological features of oxidized and reduced horizons indicated the alternation between palustrine (reduced) and non-palustrine (detrital, emerged, oxidized) events at different geomorphic and topographic positions, from the lake floor up to 7 m above it. Pedogenesis inferred and the littoral/submerged forms located at permanently emerged areas confirmed the past and present trend toward the desiccation of the lake. This study has improved our understanding of how soils form and develop within the context of geomorphic units, and can be used in making land-use decisions in the protected reserve and agricultural surroundings of the lake.

Key words: Holocene; lacustrine; playa-lake; saline; soil salinity; wetlands.

1. Introduction

In recent decades, recognition of the benefits of wetlands has increased. In particular, saline wetlands provide important habitats for biodiversity conservation; however, a lack of information has hampered the conservation of many saline wetlands, which suffer the effects of high human pressure due to intensive agricultural and urban developments. Protected areas are essential for the conservation of the habitats needed to support plants, animals, and extremophiles. Wetland protection requires previous delimitation and the delineation of thematic maps that identify the connections between landscape features, hydrology, soils, and vegetation. Unlike large inland and coastal saline lakes, which usually have particular hydrological conditions (Plotnikov and Aladin, 2011), most medium- and small-sized saline lakes are shallow, particularly, if precipitation is strongly seasonal, such as it is in the Mediterranean region and other arid and semi-arid zones (Beklioglu et al., 2007). Frequent and substantial fluctuations in water levels are a common characteristic of most shallow saline lakes; however, few studies have examined the relationships between lake water level fluctuations and the soils of inland saline wetlands. Soil moisture, flooding regime, and soil salinity have the most influence on the conditions in those wetlands. Soil processes are influenced by wetland hydrology, and some soil features can indicate specific environmental conditions.

Wetlands that have saline, hydromorphic soils are especially suited to the study of the processes that dictate the development of ecosystems. Redoximorphic features in a soil profile (Vepraskas, 1994; Otero and Macías, 2001; Richardson and Vepraskas, 2001)

are indicators of hydric soils, and have been used to identify wetlands (Brower and Fitzpatrick, 2002; Hurt and Vasilas, 2006; Johnson et al., 2011).

In addition, few studies have investigated the geomorphology of saline lakes. Although many classic studies examined the nature and typology of patterned ground and polygonal cracking on dried lacustrine bottoms (Vinogradov, 1955; Hunt and Washburn, 1966; Neal, 1972), few studies have examined the morphosedimentary characteristics of saline lake margins and the effects of fluctuations in lake water levels (Evans et al., 1964; Eugster and Hardie, 1978; Isla and Bassani, 1992; Blair, 1999).

Lake water level fluctuations during the Quaternary have received much attention, mainly because they can be used to identify past climatic and environmental changes. Usually, the fluctuations are identified by interpreting the paleoecological (e.g., diatoms, ostracods, pollen) (Gouramanis et al., 2010; Hoffmann et al., 2012) or sedimentological proxies (De Cort et al., 2013) in drill cores. In other cases, lacustrine terraces have been studied for this purpose (Bowman, 1971; Flower and Foster, 1992; Gracia, 1995; Komatsu et al., 2010; Ocakoglu et al., 2013). Most of the studies of recent changes in lake water levels have focused on the effects of climatic and hydrological changes (Comín et al., 1991; Mason et al., 1994; Rodó et al., 2002) or the effects of human activities on sediments and the environment (Ahn et al., 2006; Merlín-Urbe et al., 2011). Few studies have reconstructed recent morphological changes of saline shallow lakes, most of which were in Africa (Ghienne et al., 2002; Drake and Bristow, 2006; Burrough and Thomas, 2009). In those studies, the hydric changes in shallow lakes had a strong influence on shoreline soils. Thus, the study of shoreline soils can provide insights into historical fluctuations in the water levels of saline lakes. Few studies of semi-arid and shallow saline lakes have integrated pedological processes and geomorphologic features at a detailed scale. The objective of this study is to identify the relationships between the pedological characteristics and the geomorphic processes at Gallocanta Lake Basin, NE Spain, and their capacity to indicate past geomorphic processes and water level fluctuations in the lake.

2. Study area

2.1. Geographical and geological setting

Gallocanta Lake (40.98° N – 1.51° E), the largest and most undisturbed saline lake in Western Europe, is located in a Quaternary Depression (about 543 km²) within the Iberian Range (NE Spain), at 1000 m a.s.l. (Figure 1). The 14.43-km² lake is 7.8 km long in the NW–SE direction and 2.8 km wide. The lacustrine basin is elongated in the NW–SE direction in parallel with the mountain range that borders the NE side of the basin, which has peaks up to 1400 m a.s.l. The NE mountain range is constituted by Ordovician silica-rich rocks; e.g., quartzites and slates, and it flanks to the South an extensive fault–

bounded outcrop of deformed Mesozoic, mainly carbonatic, units (limestones and marls, Figure 1). The lake is on impermeable Upper Triassic materials (lutites and interbedded evaporites), which contributes to the high salinity of the lake, which is the highest in summer, when the water level is lowest. Groundwater salinity ranges between 0.5 and 49.4 dS m⁻¹ (García-Vera et al., 2009).

The climate in the zone is dry, semi-arid mesothermic (Liso and Ascaso, 1969). Between 1944 and 2012, mean annual rainfall was 487 mm (range = 761 mm in 1959 to 232 mm in 2001) at Tornos weather station (Figure 1). Rainfall in the area is irregular and, at least between 2000 and 2012, mean annual rainfall was 22% lower at the lakeshore (Los Picos weather station) (Figure 1) than it was at Tornos weather station. May (mean = 73 mm) and July (mean = 27 mm) usually are the wettest and the driest months, respectively. Between 1944 and 2012, the mean annual temperature was 11.3 °C, with 25% frost days per year. Maximum extreme temperatures occurred in 2001 (-22 °C) and 2012 (38.2 °C). Between 2000 and 2005, the mean annual hydric deficit was 605 mm, with evaporation of the lake >1000 mm year⁻¹ (García-Vera and Martínez-Cob, 2004). The frequent NW and W winter winds, which reach speeds of >80 km h⁻¹, and the NE summer winds exacerbate the hydric deficit (Martínez-Cob et al., 2010). Those strong prevailing winds generate waves and currents in the lake, which usually propagate toward the SE (Gracia, 2014).

Soil temperature regime is mesic, and the soil moisture regime is xeric in agricultural areas and aquic (Soil Survey Staff, 2014) at the lakeshore. Between 2000 and 2005, mean temperature 6 cm below the soil surface was 13.4 °C at the lake shoreline (García-Vera and Martínez-Cob, 2004).

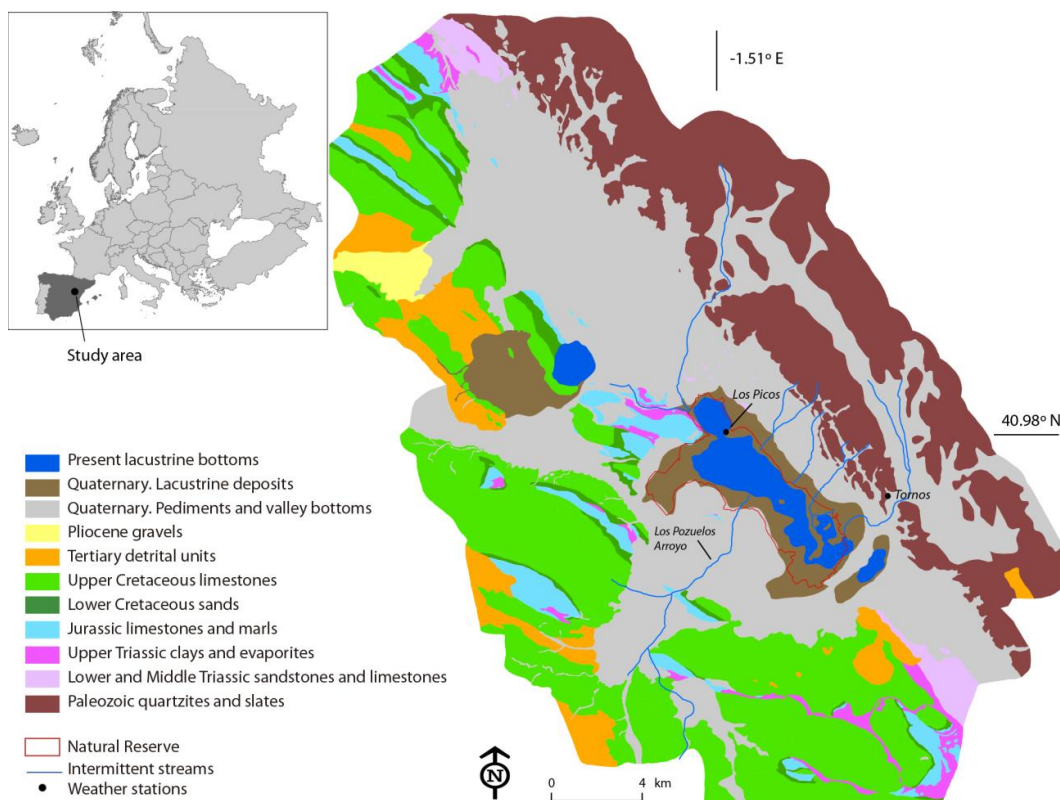


Figure 1. Geological map (after García-Vera et al., 2009), the main streams, and weather stations within the study area at Gallocanta Lake.

A 6477-ha Natural Reserve encompasses the lake, the fringes of natural vegetation that cover the lake margins, and the peripheral agricultural lands. The area is protected under EU Birds and Habitats Directives and included in the Ramsar list (Ramsar Convention Secretariat, 2010). Most of the area is devoted to rain fed agriculture, winter cereals (mainly rye) and, occasionally, sunflower. To mitigate the reduction in the water level of the lake that has occurred recently (Figure 2, García-Vera et al., 2009), irrigation from pumping wells has been reduced. Alternating wet (flooding) and dry (drought) periods, and the variation in salinity have led to the formation of biological communities that contain species that are adapted to droughts (Gómez et al., 1983). The vegetation in the SW margin includes prairies of *Salicornia patula*, *Puccinellia pungens*, and *Limonium costae* near the lakeshore, and prairies of *Juncus* and *Bolboschoenus maritimus* closer to the crops. In the NE margin, the most saline fringe of vegetation includes *Aeluropus littoralis*, *Suaeda splendens*, *Suaeda spicata*, *Salicornia patula*, *Sphenopus divaricatus*, and *Limonium costae*. Plants such as *Elymus* cf. *pungens*, *Dactylis glomerata*, *Medicago sativa*, *Tragopogon dubius*, and *Crepis pulchra* occur in uncultivated agricultural plots.

The water in the lake is vital for the biodiversity of the area, especially, for the well being of thousands of migratory and wintering birds (Léranos and González, 2009). The

amount of water the lake holds changes naturally at various time-scales (Comín et al., 1991; Rodó et al., 2002; Díaz de Arcaya et al., 2005; Luzón et al., 2007b; Castañeda and Herrero, 2009a; García-Vera et al., 2009; Gracia, 2009). Since 1974 (Figure 2) there have been several drought periods in which the water level of the lake was at or near zero, and a very wet period in the mid-1970s, with a maximum registered water level of 2.84 m in 1974 (Pérez, 2014).

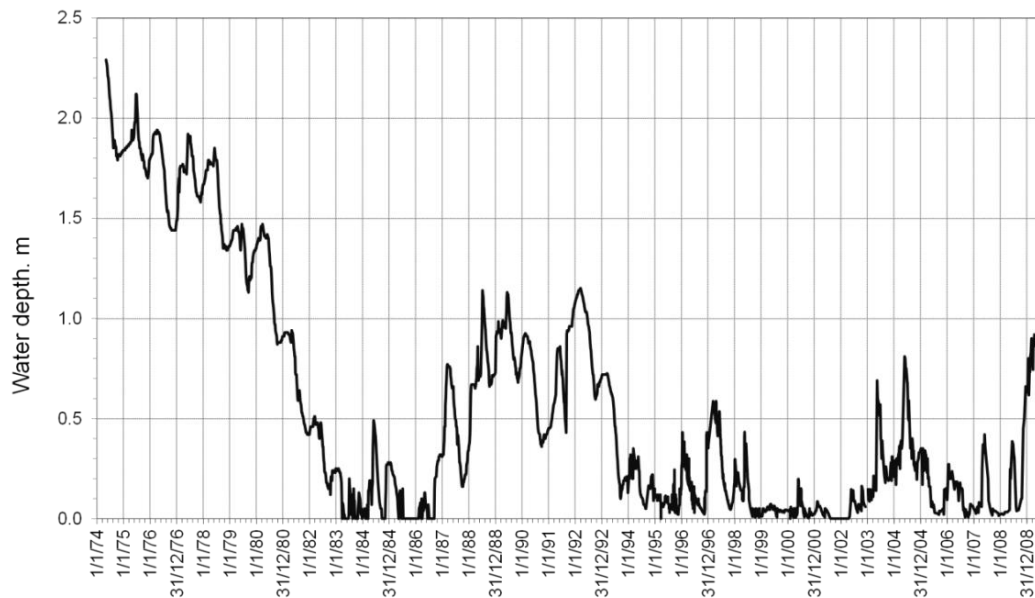


Figure 2. Water depth of Gallocanta Lake from 1974 to 2002 (García-Vera et al., 2009).

2.2. Geomorphological setting

Various levels of stepped Quaternary alluvial fans and pediments develop on both margins of the Gallocanta depression. Most of the NE side of the lacustrine basin has a steep slope, influenced by its proximity to the mountain range, where the peaks are about 400 m above the lake floor. The SW side has a gentle relief, which is the result of carbonate outcrops that have been affected by intense karstic weathering and relief lowering, which have peaks that are < 50 m above the lake floor (Figure 3).

The depression is a karst polje that developed during the Quaternary (Gracia et al., 2002). Several weathering planation surfaces occur in the basin, and the lowest two surround the main lake on the S, SW, and W sides, which develop on Jurassic limestones. The depression and the planation surfaces probably formed after a regional extensional tectonic phase in the Late Pliocene (Gutiérrez et al., 2008). At that time, the lowering of the local water table, which would have promoted vertical dissolution (until the epiphreatic zone was reached), caused the deepening of the polje bottom and the development of stepped planation surfaces. Once the polje floor reached the impervious Triassic substratum, a stable lacustrine system developed. Consequently, the formation of Gallocanta Lake is associated with the interruption of the deepening of the polje about

12 200 yr BP, in the Late Pleistocene (Burjachs et al., 1996). Lacustrine sediments under the lakebed are only about 1–2 m thick; however, they reflect various climatic and environmental changes caused by flooding and desiccation (Schütt, 1998; Rodó et al., 2002). Calvo et al. (1978) analyzed the mineralogy of the lake bottom sediments and their vertical variations in some cores made on the center of the lake. Pérez et al. (2002) and Luzón et al. (2007b) studied the stratigraphical record and sedimentology of the lake bottom sediments through several cores made along a transect NE–SW oriented and used the data to interpret environmental and climatic changes during the Holocene.

In summary, the low plains surrounding the lake are formed by sedimentary flats, mostly covered by halophytes, while rock outcrops near the lake only appear on the western margin, where some planation surfaces on Jurassic carbonates extend to the lake (Figure 1). Elsewhere, the lake is surrounded by a set of alluvial fans and lacustrine terraces that are elevated a few meters relative to the lake bottom.

3. Methods

Geomorphological photointerpretation and mapping, as well as systematic field inspection of the lake margins were improved with respect to previous studies (Castañeda et al., 2013a). Airborne LiDAR data for the lake and surrounding areas were obtained from the National Geographic Institute, with an absolute vertical accuracy of 0.20 m and a density of $0.5 \text{ p} \times \text{m}^{-2}$. The resulting topographic model was used for an accurate location and height definition at a sub–metric scale of the different landscape elements previously recognized along the lake margins. Soils were sampled at the two longest margins of the lake based on a geomorphological map of the central section of the lake (Castañeda et al., 2013a). The sampling sites of the 11 soil profiles were along one of two toposequences (about 1500 m and 2000 m long) that crossed the northern and southern margins of the lake, respectively (Figure 3). Both transects covered gradients in moisture and soil salinity. The profiles were dug within various geomorphic units, between the pediments and the lake floor, in parallel with the plant communities, from the crops to the halophyte fringes and the bare lake floor. The elevation of the sampling sites relative to the elevation of the lakebed ranged from 4.3 m at the southern margin to 15.3 m at the northern margin (Table 2).

Soil sampling was performed in October 2010, and in July and October 2011. In 2010 and 2011, the annual rainfall was 359 mm and 276 mm, or 74% and 54% of the mean annual rainfall (487 mm), respectively. At lake level (Los Picos weather station, Figure 1), rainfall was very low in 2011 (156 mm). Pits that reached the water table had to be bailed out several times and an auger was used to collect soil samples. Fifty–two soil samples were collected and specific horizons were sampled for micromorphological analyses.

Soil samples were air-dried at room temperature before being dried in an oven at ≤ 40 °C, and sieved through a 2-mm mesh. Soil salinity was measured as the electrical conductivity of the 1:5 soil:water extract (EC1:5) and the saturated paste extract (ECe) (United States Salinity Laboratory Staff, 1954). Electrical conductivities were expressed in dS m^{-1} at 25°C. Calcium carbonate equivalent (CCE) was quantified by gasometry, gypsum content was quantified by thermogravimetry (Artieda et al., 2006), and organic matter (OM) was quantified by chromic-acid digestion and spectrophotometry. Texture was assessed by laser diffraction, with a correction for the clay value (following Taubner et al., 2009). To compare the soil profiles, we calculated the proportions of CCE, gypsum, OM, sand, silt, and clay at soil depth intervals of 25 cm, and these layers were designated as 'synthetic layers 25 cm depth'. The values from the synthetic layers were the mean of the soil samples weighted by their depth interval (<http://digital.csic.es/handle/10261/60892>), up to 150 cm or to the maximum depth of the shallowest pits. Genetic and diagnostic horizons and soil taxonomic classifications were based on Soil Survey Staff (2014). Thin sections (135 × 58, and 58 × 42 mm large) of the horizons were prepared based on the method of Guilloré (1985), after they had been impregnated with a cold-setting polyester resin, and described following Stoops (2003).



Figure 3. Location of the soil profile sites in two margins in the central section of Gallocanta Lake. Orthophotographs were taken in 2006–2007. The main arroyos are indicated in blue. Black rectangles indicate the location of the areas shown in Figures 4 and 6.

4. Results

4.1. Geomorphological context of the two lake margins

The NE and the SW shores of the lake differ in several important respects. The structurally controlled morphological asymmetry of the depression makes the fans on the northern margin short (mean length = 1.5 km), with a mean slope of 4%. Those fans are about 6 m higher than the lake bottom, and mainly comprise quartzitic boulders and coarse gravels. Streams reaching the lake in this margin are ephemeral and inset on the fans forming flat-bottomed valleys filled with colluvial sediments (Figure 4). In the valley

bottoms, the high water table gives rise to springs and small wetlands near the lakeshore, where the longitudinal valley gradients are lower.

Inset on the fans, a 300-m wide plain has developed on a lacustrine terrace about 2 m higher than the lakebed (Figures 4 and 5A), which is characterized by four small elongated vegetated marginal wetlands, marshes, and palustrine zones broadly parallel to the main lakeshore. Those located on the east side of the lake receive water from a valley coming from the mountain range, which has caused the wetlands to expand. Each wetland has a central wet area fringed by marshes or crops mostly elongated parallel to the lakeshore. The wetlands are separated from the lake by a narrow sandy barrier covered with pioneering halophytes (*Salicornia*) (Figure 5B) or by a narrow beach (about 0.5 m high) fringed by hygrophilous vegetation (*Juncus*) (Figure 5C). A continuous low cliff <1 m high affects the sedimentary units along this NE lake margin. The concentration of wave energy caused by the orientation of the lake and the prevailing winds contribute to the eroded nature of this shoreline.

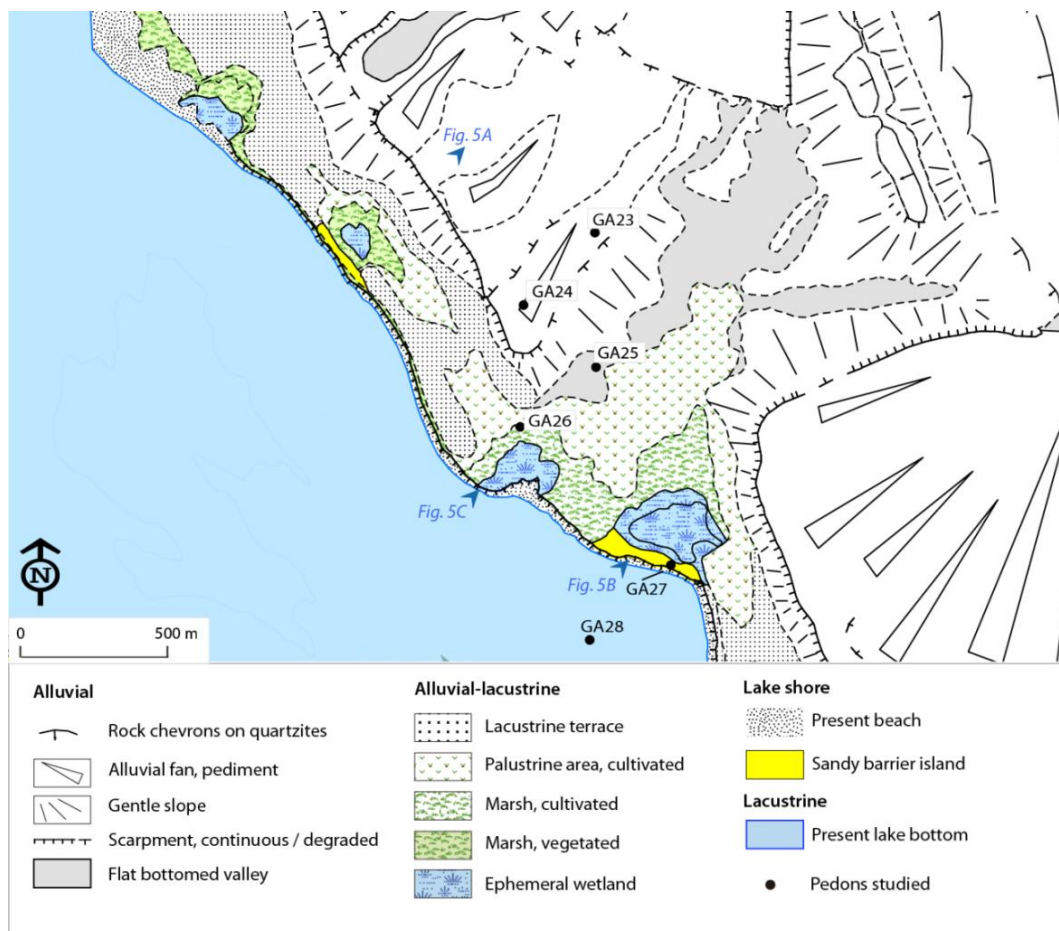


Figure 4. Geomorphological map of a section of the NE shoreline within the central section of Gallocanta Lake (slightly modified from Castañeda et al., 2013a). The six soil sampling sites are indicated, GA23 to GA28.



Figure 5. The NE shoreline of Gallocanta Lake in summer 2013. A: Alluvial fans that extend from the base of the mountain, the vegetated lake margin, and the dry lake. B: sand barrier covered with pioneering halophytes; C: The lake floor and a vegetated marginal wetland with *Juncus*. Geographical locations are indicated in Figure 4.

The southern fans that reach the lake are large (>8 km long), have a gentle (mean <1%) slope, and comprise medium-sized polymictic gravels to sands. Most of those fans originate at the foot of low reliefs and outcrops of Jurassic and Cretaceous limestones. The largest fan, which is closest to the lake, is about 10 m above the lakebed. The main fluvial water and sedimentary input to the lake (Los Pozuelos Arroyo, Figure 3) are at a central point on the SW shore, which leads to a small delta. An abandoned paleovalley associated with this arroyo can be recognized to the west of the present, active mouth. This arroyo is an ephemeral channel (Figure 7A) that drains a >100-km² basin which represents the most important source of sediment supply to Gallocanta Lake. Consequently, the SW margin has a predominantly sedimentary character, forming a wide (up to >600 m) planar fringe, inset >5 m on the lowest karstic planation surface of the basin.

The SW lake shore is formed by a series of parallel bands, mostly vegetated, where vegetation density increases with elevation. Connections between adjacent plains consist of small declines and degraded low cliffs. At about 1 m above the lake floor, a wide sedimentary active zone has formed, comprising several sandy barrier islands and sublittoral bars, most of which are roughly parallel to the shore, 150–500 m long, 50–100 m wide, usually <1 m high, and proceed to the lake over gentle declines (Figures 6 and 7B). Between the sandy barrier and the mainland, a usually dry lagoon develops, which is covered by bare muds. Wind-driven waves in the lake create a prevailing longshore current to the SE. Various sedimentary bodies and recurved spits, similar to those of marine coasts, develop parallel to this prevailing current. Differences in exposure to waves and currents have dictated the nature of the sedimentary forms and their prevailing texture: sands in the most exposed outer faces of the islands and bars, silts in the sheltered zones, and clays in the completely protected lagoon (Figure 6). Progradation and progressive emergence of the SW lake shore is producing a shifting of the lake

bottom to the NE. Sedimentary aggradation in the sheltered lagoon is indicated by the partial burial of vegetation remains and tumbleweeds that reach this zone and are apparent during droughts.

In addition to promoting erosion or sedimentation in the lake margins, past lake water level fluctuations have influenced the shifting of the border between natural vegetation and agricultural lands. In recent years, the water level of the lake has remained low (Figure 2), and the area near the lake devoted to crops has expanded in parallel to the natural shaping and reworking of the shoreline landforms.

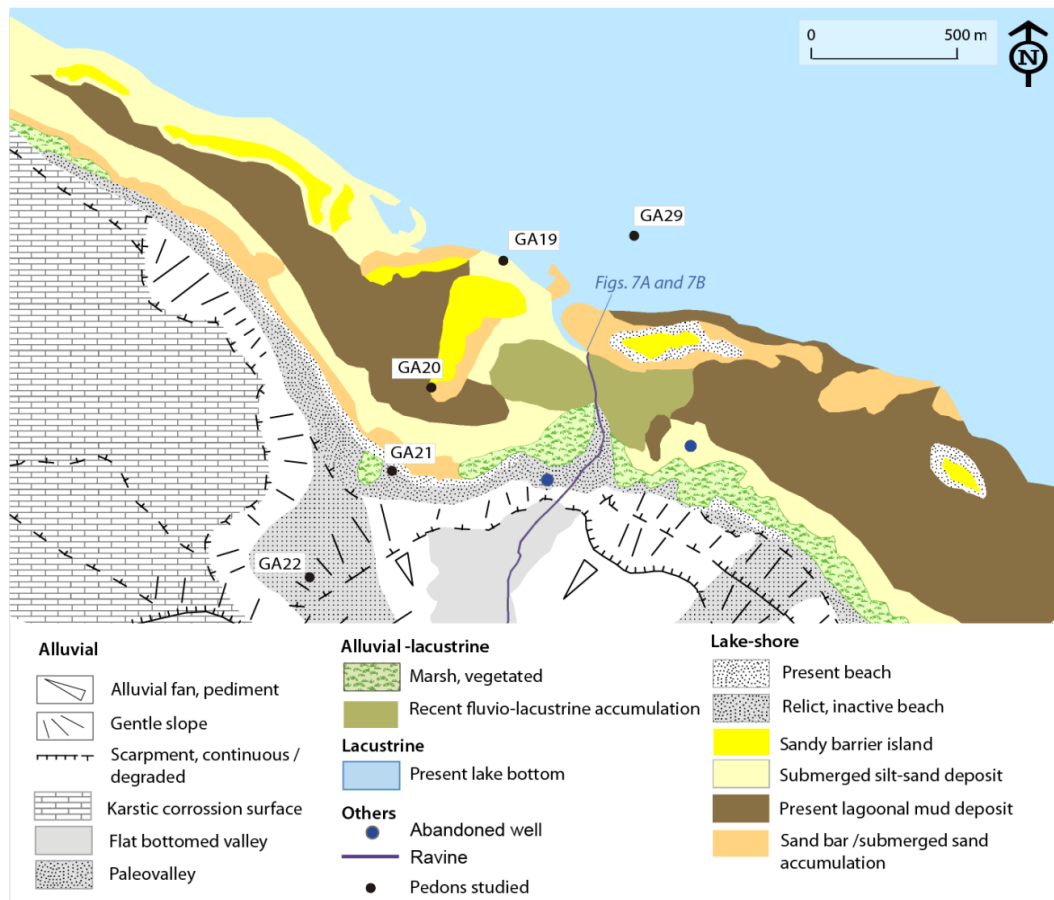


Figure 6. Geomorphological map of the SW shoreline of the central section of Gallocanta Lake (modified from Castañeda et al., 2013a). Five soil sampling sites are indicated (GA19 to GA22 and GA29).

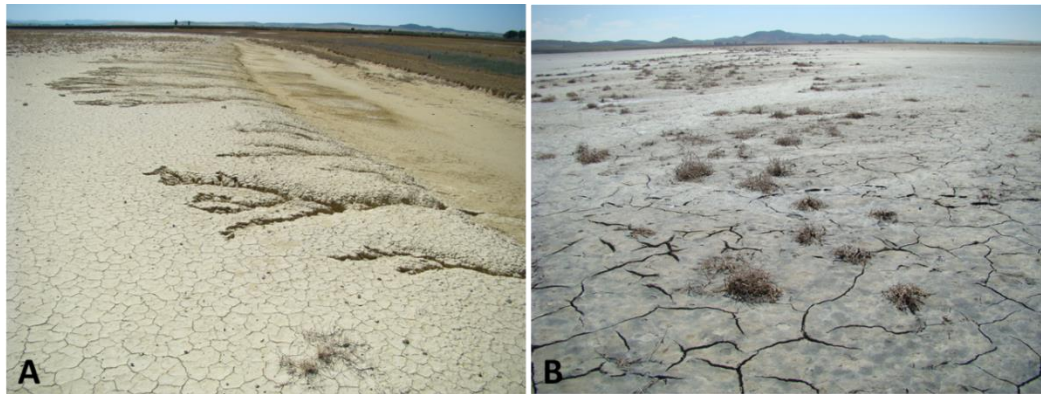


Figure 7. The SW shoreline of Gallocanta Lake in summer 2013. A: Near the mouth of Los Pozuelos arroyo, where it intersects a littoral sand bar; several small gullies erode the sands and form small alluvial fans on the dry arroyo thalweg. B: Sublittoral bar, emerged during a dry period, with tumbleweeds (*Salsola kali*) trapped on the silty surface.

4.2. Soil composition and morphology

The depth of the studied pedons ranges from 60 cm at the highest landscape position, the alluvial fan, to 185 cm at the lake floor. Groundwater was reached in 9 out of the 11 profiles, even in soils >6 m above the lake floor (GA25). Groundwater is saline (up to 114 dS m^{-1}) at the lake floor (GA28 and GA29), sublittoral sand bars (GA19, GA27), and the lagoon (GA20). Non-saline groundwater was reached at GA25 and GA26 at the NE margin, and at GA21 and at GA22 at the SW margin (Table 1).

Table 1. Characteristics of the sampling sites at Gallocanta Lake, Spain.

Pedon	Elevation (m a.s.l.)	Ground- water level (cm)	EC ¹ (dS m ⁻¹)	Vegetation	Soil classification (SSS, 2014)
GA23	1007.2	*		Winter cereal stubble (Rye, barley)	Petrocalcic Calcixerept
GA24	1001.3	*		Winter cereal stubble (Rye, barley)	Typic Calcixerept
GA25	998.2	170	0.7	Winter cereal stubble (Rye, barley)	Pachic Calcixeroll
GA26	993.8	160	0.8	Winter cereal stubble (Rye, barley)	Pachic Calcixeroll
GA27	993.4	152	46.1	Prairies of <i>Puccinellia</i> and <i>Salicornia</i>	Typic Haplosalid
GA28	991.9	90	110.9	Saline crust/algal mats	Gypsic Aquisalid
GA22	995.4	95	0.9	Recently plowed	Typic Calcixerept
GA21	993.1	146	1.5	Prairies of <i>Puccinellia</i> and <i>Limonium</i>	Aquic Calcixerept
GA20	991.9	172	42.1	Prairies of <i>Puccinellia</i> and <i>Salicornia</i>	Typic Haplosalid
GA19	991.6	84	52.5	Prairies of <i>Salicornia</i>	Typic Aquisalid
GA29	991.2	80	114.4	Saline crust / algal mats	Gypsic Aquisalid

¹Electrical conductivity; *Not detected.

Soil pH ranges from 7.6 to 8.7 (Table 2). ECe and EC1:5 are strongly linearly correlated ($R^2 = 0.91$). Mean ECe is 36.6 dS m^{-1} (range = $0.3\text{--}188.6 \text{ dS m}^{-1}$). A majority (53.8%) of the soil samples are very strongly saline ($\text{ECe} > 16 \text{ dS m}^{-1}$). For comparison purposes, based on the average ECe in the upper 50 cm, the soils are moderately saline (ECe up to 6.3 dS m^{-1}) at the sublittoral bars and the lagoon grasslands (Table 2), and very strongly saline (ECe up to 31.8 dS m^{-1}) at the lake floor. All of the other soils are non-saline except the upper soil horizon of the inactive beach ($\text{ECe} = 3.4 \text{ dS m}^{-1}$). In the soil profile, soil salinity decreases with depth (Figure 8), which reflects evapoconcentration in the upper horizons, in agreement with the hydric deficit ($>380 \text{ mm}$) accumulated in the months before the field seasons. Four of the eight pedons out of the lake floor support halophytic vegetation (Table 1).

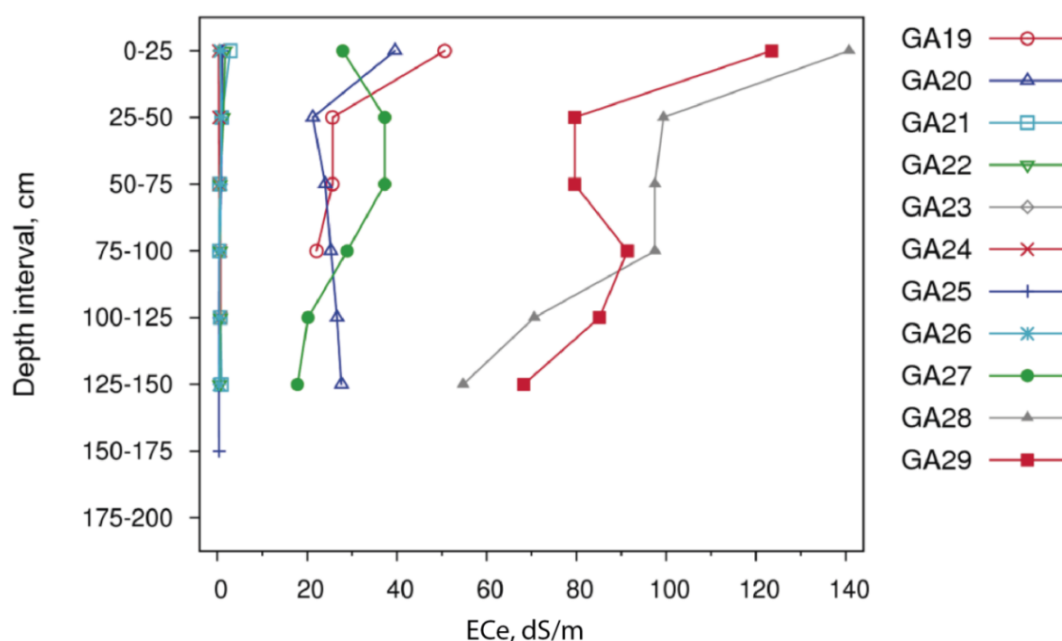


Figure 8. Soil salinity (ECe) in the 11 pedons at Gallocanta Lake, expressed as the values from 25-cm-thick synthetic soil layers.

The average calcium carbonate equivalent (CCE) is 37.3% (range = 3.9–72.2), with significant differences ($p < 0.05$) between the NE and SW margins (32.3% and 42.8%, respectively). Typically, the upper horizons have lower CCE than the deeper horizons (Table 2, Figure 11). Mean gypsum content is 5.1%, and the highest concentrations occur in the upper horizons of the lake floor, pedons GA28 (28.6%) and GA29 (33.7%). The organic matter content (mean 1.3%) ranges from 0.3% to 6.3%, and is highest at the lake floor (Ayzg). Away from the lakebed, the organic matter accumulated in A and Ap horizons rather than in Ag horizons (Table 2).

Soils have a predominantly sandy and loamy texture, with a mean sand content of 56.7% (range = 12.5–96.4), more than twice the mean content of silt (21.7%) or clay (25.6%). Sand content is 38% higher in the upper horizons than it is farther below and, frequently, sand content is high at a depth of about 100 cm, which corresponds to horizons with low clay content (Table 2, Figure 11). The soil samples from the NE and SW margins of the lake differ significantly ($p < 0.05$) in silt content (25.8% and 17.2%, respectively). Fine to coarse gravels of quartzites and shales predominated, with the highest proportion (about 50%) at the paleovalley (GA22) and the alluvial fan (GA24) soils.

Table 2. Physical and chemical properties of the soils at Gallocanta Lake, Spain. See Figures 4 and 6 for pedons location. EC(1:5): Electrical conductivity of the 1:5 soil:water extract; ECe: Electrical conductivity of the saturated extract; PS: percentage of saturation of the saturated extract; pHp: pH of the saturated extract; CCE: Calcium carbonate equivalent; OM: organic matter; nd: Not determined.

Horizon	Depth cm	Munsell color Moist	EC(1:5) dS m ⁻¹ at 25 °C	ECe	PS %	pHp	CCE	Gypsum ----- %	OM ----- %	Sand	Silt	Clay	USDA textural class
Pedon GA22													
Ap	0-38/44	2.5Y 3.5/2	0.3	1.7	52	8.3	44.2	2.3	2.2	53.4	30.6	16.0	Sandy loam
Bwk	38/44-66/84	10YR 6/4	0.1	0.6	30	8.3	44.3	0.0	0.6	87.9	9.8	2.3	Sand
Ck1	66/84-110	7.5YR 6.5/4	0.1	0.6	27	8.2	46.3	0.0	0.4	94.8	4.2	1.0	Sand
2C2	110-125	2.5YR 6/6	0.1	0.7	45	8.3	47.6	0.0	0.2	68.9	15.2	15.9	Sandy loam
3C3	125-155	2.5Y 6/3 - 2.5Y7/4	0.1	0.5	53	8.3	35.8	0.0	0.1	40.3	33.1	26.6	Loam
Pedon GA21													
A	0-16/23	2.5Y 4/2	0.4	3.4	45	8.1	34.1	1.9	2.1	74.6	19.4	6.0	Sandy loam
Bwk	16/23-50	2.5Y 6/3	0.2	0.9	40	8.3	56.1	0.0	0.7	59.4	11.9	28.7	Sandy clay loam
2Ckg1	50-112/116	7.5YR 5/8	0.1	0.4	23	8.5	21.3	0.0	0.1	88.8	10.5	0.7	Sand
3Ckg2	112/116-150	10YR 7/6	0.1	0.9	61	8.2	72.2	0.0	0.1	31.3	19.5	49.2	Clay
4C	150+	7.5YR 5/8	0.1	0.5	64	8.2	2.9	0.0	0.0	51.0	34.7	14.3	Loam
Pedon GA20													
Ag	0-15	2.5Y 4/2	8.1	51.9	56	8.3	40.4	3.4	1.0	55.7	25.4	18.8	Sandy loam
Cg1	15-48	5Y 6.5/2	3.3	21.1	67	8.2	49.1	1.9	0.3	46.1	8.5	45.4	Sandy clay
2Cg2	48-70	5Y 8/1 -- 10YR 7/4	2.4	23.7	40	8.1	51.1	1.0	0.2	53.1	0.7	46.2	Sandy clay
3Cg3	70 - 107/114	5Y 8/1 -- 10YR 7/4	2.4	25.3	39	8.1	37.7	0.9	0.2	55.5	9.7	34.8	Sandy clay loam
4Cg4	107/114-170	2.5Y 6.5/4	2.7	27.7	37	8.3	61.0	0.8	0.1	47.0	4.1	48.9	Sandy clay
Pedon GA19													
Ag	0-10	2.5Y 6/2	9.4	67.7	47	8.3	37.6	4.4	0.8	61.2	18.5	20.4	Sandy clay loam
2Cg1	10-25	2.5Y 6.5/1.5	8.3	39.3	89	8.1	58.7	3.8	0.5	14.1	49.0	36.9	Silty clay loam
2Cg2	25-90	2.5Y 7/1.5	4.0	25.7	60	8.1	69.7	2.2	0.5	23.6	33.3	43.1	Clay

Table 2. Physical and chemical properties of the soils at Gallocanta Lake, Spain (cont.).

Horizon	Depth cm	Munsell color Moist	EC(1:5) dS m ⁻¹ at 25 °C	ECe	PS %	pHp	CCE	Gypsum %	OM	Sand	Silt	Clay	USDA textural class
3Cg3	90+	2.5Y 7/4	2.7	16.7	67	8.1	50.4	1.6	0.3	12.5	12.5	75.0	Clay
Pedon GA29													
Aygz	0 - 6/8	7.5B 2.5/1	47.9	188.6	54	8.0	14.3	33.7	5.1	67.2	23.4	9.4	Sandy loam
Cyg1	6/8- 24	7.5Y 6/1 -- 10B 4.5/1	19.8	99.3	71	8.4	27.8	24.8	4.4	54.2	18.9	26.9	Sandy clay loam
Cyg2	24- 80	5GY 6/1 -- 7.5GY 7/1	15.5	79.6	68	8.1	41.2	27.7	1.4	29.0	22.9	48.0	Clay
2Cyg3	80-110	5Y 7/1	16.1	94.3	56	7.6	37.2	7.1	1.3	68.5	11.9	19.6	Sandy loam
3Cg	110-140	7.5Y 6/4	8.8	79.0	37	7.9	39.3	1.8	1.2	65.1	1.1	33.7	Sandy clay loam
4Cg	140-170	5Y 7/3	9.8	52.1	71	8.2	50.2	2.7	0.9	37.2	0.5	62.3	Clay
Pedon GA23													
Ap	0-28/31	7.5YR 3.5/3.5	0.2	0.5	47	8.3	23.0	3.2	3.7	72.8	22.5	4.7	Sandy loam
Bkm	28/31-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pedon GA24													
Ap(1 & 2)	0-29/34	10YR 3.5/4 -- 5/4	0.2	0.3	42	8.1	13.3	3.2	1.6	55.5	30.6	14.0	Sandy loam
Ck1	29/34-65/75	7.5YR 4.5/6	0.2	0.4	49	8.1	36.0	2.3	0.8	42.8	32.5	24.7	Loam
2Ck2	65/75-105/110	5YR 5/8	0.2	0.7	28	8.3	27.9	1.1	0.2	84.5	12.9	2.6	Loamy sand
3Ck3	105/110-135/140	5YR 6/8	0.1	0.7	12	8.3	31.8	0.0	0.1	96.4	3.5	0.2	Sand
Pedon GA25													
Ap	0-35/40	10YR 3/2	0.3	1.1	47	8.2	25.6	3.2	3.2	60.4	29.8	9.8	Sandy loam
A	35/40-50/55	10YR 4/2	0.3	0.9	45	8.5	44.1	2.6	1.7	55.2	24.9	19.9	Sandy loam
Bwk	50/55 -100	2.5Y 6/3	0.2	0.4	51	8.5	49.7	3.1	0.6	40.5	25.5	34.0	Clay loam
2C	100-125/135	10YR 4/2	0.1	0.3	8	8.5	31.1	0.0	0.2	85.6	11.0	3.4	Loamy sand
3Ck	125/135-180	7.5YR 6/8	0.1	0.4	33	8.1	38.5	1.2	0.2	66.6	25.9	7.5	Sandy loam

Table 2. Physical and chemical properties of the soils at Gallocanta Lake, Spain (cont.).

Horizon	Depth cm	Munsell color Moist	EC(1:5) dS m ⁻¹ at 25 °C	ECe at 25 °C	PS %	pHp	CCE	Gypsum ----- % -----	OM ----- % -----	Sand	Silt	Clay	USDA textural class
Pedon GA26													
Ap	0-29/33	10YR 3/2	0.2	0.6	50	8.3	27.1	3.3	2.4	60.8	30.0	9.1	Sandy loam
A	29/33-60	2.5Y 3/2	0.3	0.9	63	8.7	33.9	3.1	1.3	31.9	27.5	40.6	Clay
Bwk	60-131/136	2.5Y 7/2	0.2	0.5	50	8.5	62.8	0.0	0.4	44.3	18.8	36.9	Clay loam
2Ck	131/136-165	2.5Y 6/4	0.3	0.4	34	8.4	25.4	0.0	0.1	68.9	21.9	9.3	Sandy loam
Pedon GA27													
Ayz	0-12	10YR 5/2	3.7	17.8	43	7.8	36.6	3.7	2.0	72.5	18.4	9.1	Sandy loam
2C	12-84/90	2.5Y 7/1	4.7	37.3	35	7.8	52.6	3.9	0.6	41.7	25.3	33.0	Clay loam
3C	84/90-115/120	2.5Y 5/2	2.0	21.2	35	8.2	13.4	1.2	0.1	75.5	16.6	7.8	Sandy loam
4C	115/120-170	10YR 6/3	3.5	17.8	58	8.1	34.6	2.6	0.1	35.6	25.6	38.8	Clay loam
Pedon GA28													
Ayzg	0 - 6/10	10B 2.5/1	65.8	182.3	54	7.9	18.44	27.1	5.8	79.8	15.5	4.7	Loamy sand
Cyg1	6/10 - 14/16	10B 2.5/1 -- 5Y 6/1	36.2	145.5	74	8.5	29.33	14.5	6.2	62.4	25.1	12.4	Sandy loam
Cyg2	14/16 - 24	10B 5.5/1	23.7	104.6	73	8.6	36.63	17.0	3.9	44.0	31.6	24.4	Loam
2Cyg3	24 - 42	2.5GY 6/1	23.2	100.3	72	8.2	27.95	28.6	3.4	44.8	26.4	28.8	Clay loam
2Cyg4	42 - 106	7.5GY 6/1	22.6	97.5	83	7.9	52.02	5.7	1.2	15.0	40.2	44.7	Silty clay
3Cyg5	106 - 110	10Y 7/1.5	17.5	82.0	71	7.7	35.98	4.4	1.0	16.1	38.2	45.7	Clay
4Cyg6	110 - 115	2.5Y 7/4	10.3	55.0	74	7.7	27.73	3.1	1.1	13.7	29.8	56.6	Clay
5Cy1	115 - 148	10YR 6/5	10.1	54.9	72	7.8	23.21	3.1	1.1	15.1	36.1	46.8	Silty clay
6Cy2	148 - 160	7.5YR 5.5/6-	10.0	54.7	69	7.9	18.70	3.0	1.0	16.6	42.5	40.9	Silty clay
7C	160 - 185	5YR 3.5/4	12.2	73.1	nd	nd	15.92	4.3	0.7	16.5	44.8	38.7	Silty clay loam

Two main horizon sequences are recognized, A–C and A–Bwk–C (Table 2, Figure 9), with frequent wavy boundaries between horizons. The diagnostic horizons (Soil Survey Staff, 2014) are Ochric, Mollic, Petrocalcic, Calcic, Gypsic and Salic. Calcic horizons occur at both lake margins, although best developed in the northern alluvial fan soils, and there are multiple generations of recemented breccia and laminae (GA23, Figure 9). A discontinuous Bkm horizon occur at the subsurface (~100 cm) of the inactive beach, GA21 (Figure 6). Carbonate coatings and pendants are common at several landscape positions, soft powdery carbonates are present in the southern soils, and carbonate nodules are common in the northern soils (Figure 9). Gypsic and Salic horizons occur to a depth of 100 cm at the lake floor, and Salic horizons occur at the margins of the lake (GA19, GA20, and GA27). Mollic horizons are present in the flat-bottomed valley. Soil classifications (Table 1) indicate that soil types are distributed among the geomorphic units in a consistent manner (Figure 11).

Stone lines are at the lake floor, i.e., a 4-cm-thick stone line of fine, rounded quartz gravels in GA29, and at the northern pediment (Figure 9). Here, a sandy layer with coarse subrounded quartzitic gravels and cobbles is found in GA24, and subhorizontally oriented subangular tabular quartzitic stones are parallel to the slope in the marsh soil (GA26).

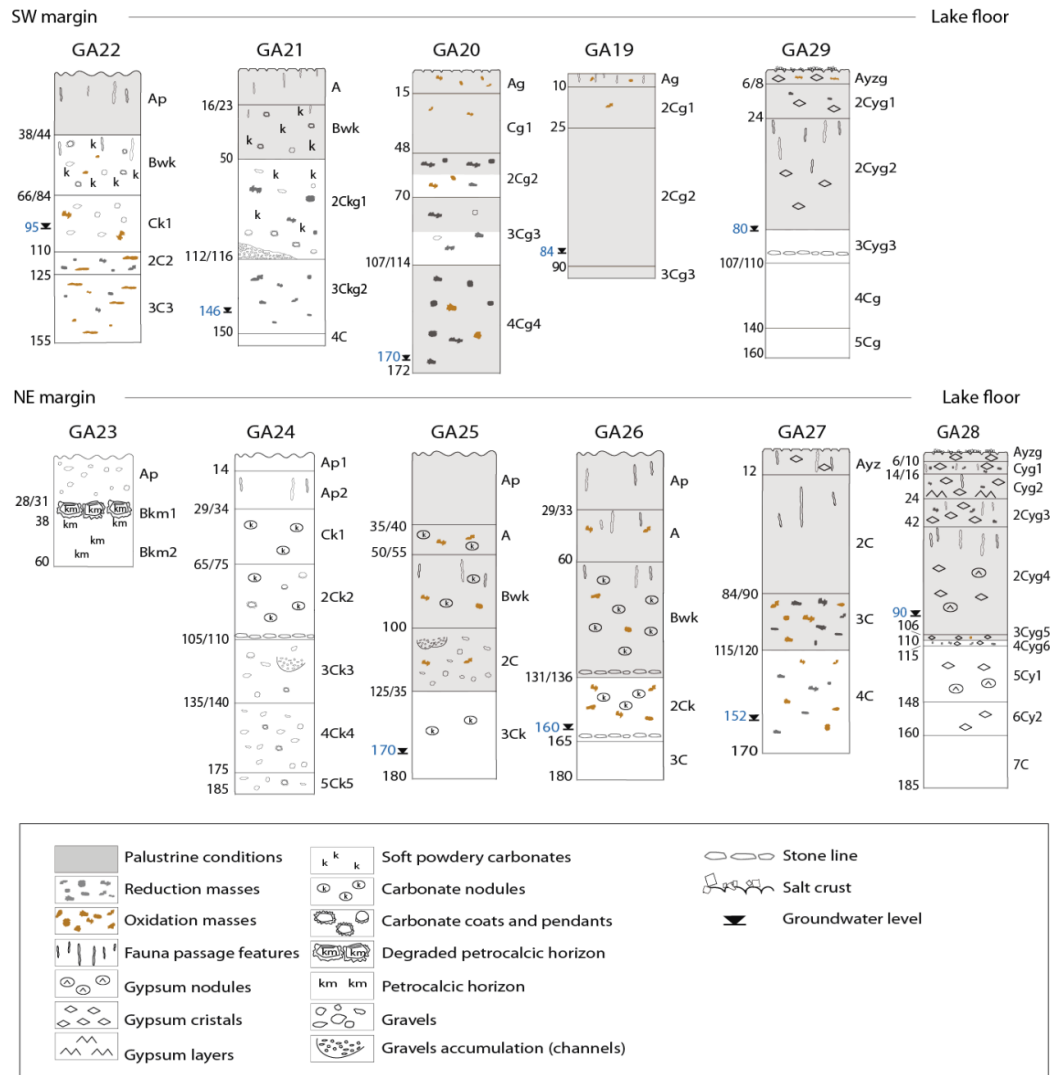


Figure 9. Macromorphological features of the soil profiles at the NW and SW margins of the central section of Gallocanta Lake.

4.3. Soil color and redoximorphic features

Soil surface horizons at the lake floor display the strongest gley hues (7.5B and 10B) and the lowest chroma (Table 2), and samples in the hand had a 'rotten eggs' odor. All of the soil surface horizons sampled at the SW margin exhibit a strong gleying matrix, with hue color 2.5Y and chroma ≤ 2 , which indicates that they formed under reduced conditions. At the NE margin, soil chroma is ≤ 2 ; specifically, in the soils at the lowest landscape positions: the sand bar (GA27), the marsh (GA26), and the valley (GA25). At the alluvial fans, both the chroma and the hue of soil surface horizons increase with elevation (Table 2).

Iron and/or manganese mottles are present in all of the soils examined (Figure 9), except at the alluvial fan (GA23 and GA24). Mottles rich in iron and/or manganese oxides have a chroma that ranges from 4 to 8, are common in surface horizons, and mainly are

associated with pores, coarse fragments, and root channels. In subsurface horizons, these mottles are under either oxidizing or reducing conditions (i.e., GA19, GA20, GA28, and GA29 in the reducing matrix, and GA22, GA25, GA26, GA27 in the oxidizing matrix). Occasionally, the mottles form bands which reflect the circulation of water or air through preferential planes (GA29). In general, mottles poor in iron and/or manganese oxides have a chroma ≤ 2 and occur in horizons that are currently under reducing conditions.

Current reducing conditions are identified in soils at the lake floor (GA28 and GA29), the sublittoral sand bar (GA19), and the lagoon (GA20). Typically, gleying is strongest (chroma < 2) in the subsurface horizons of those soils. Other soil surface horizons with chroma ≤ 2 (GA21, GA22, GA25, GA26, GA27) are under oxidizing conditions, as indicated by their agro–pastoral use (e.g., GA22), which indicates that the (former) water saturation milieu that was responsible for the reducing conditions is no longer present. Nevertheless, all of the studied soils, except those at GA25 (Figure 4), maintain the reduction in their subsurface horizons.

Micromorphological observations of the samples from surface horizons indicate a typical peloidal morphology (Platt, 1989; Freytet and Verrechia, 2002) of the micromass (Figure 10A), with isolated or coalescent peds, and a blocky structure in the subsurface horizons (Figure 10B). Lenticular gypsum is present as random crystal intergrowths (Figure 10A). Carbonate coatings, some of which with sequential aggradation and dark rims, are common in the gravel–sized fragments of the Ap horizon (Figure 10C), probably reworked by agricultural plowing. Some channels of the subsurface horizons exhibit a grey micritic coating (Figure 10D), and carbonate recrystallization includes well developed crystals (Figure 10E). Biological remains such as oogonia (Figure 10F) and stems of *Charophyte*, shells of Ostracods (Figure 10G) and aquatic Gastropods, and phytolites are common in surface horizons. Other features associated with biological activity such as passage features with crescent internal fabric, chambers and channels, loose continuous and discontinuous microgranular infillings, are especially abundant in the subsurface horizons. Impregnative redoximorphic features such as Fe–Mn oxide hypocoatings with associated coatings (Figure 10H) are present in aggregate faces along voids, which are reflected in the iron and or manganese mottles observed in the field.

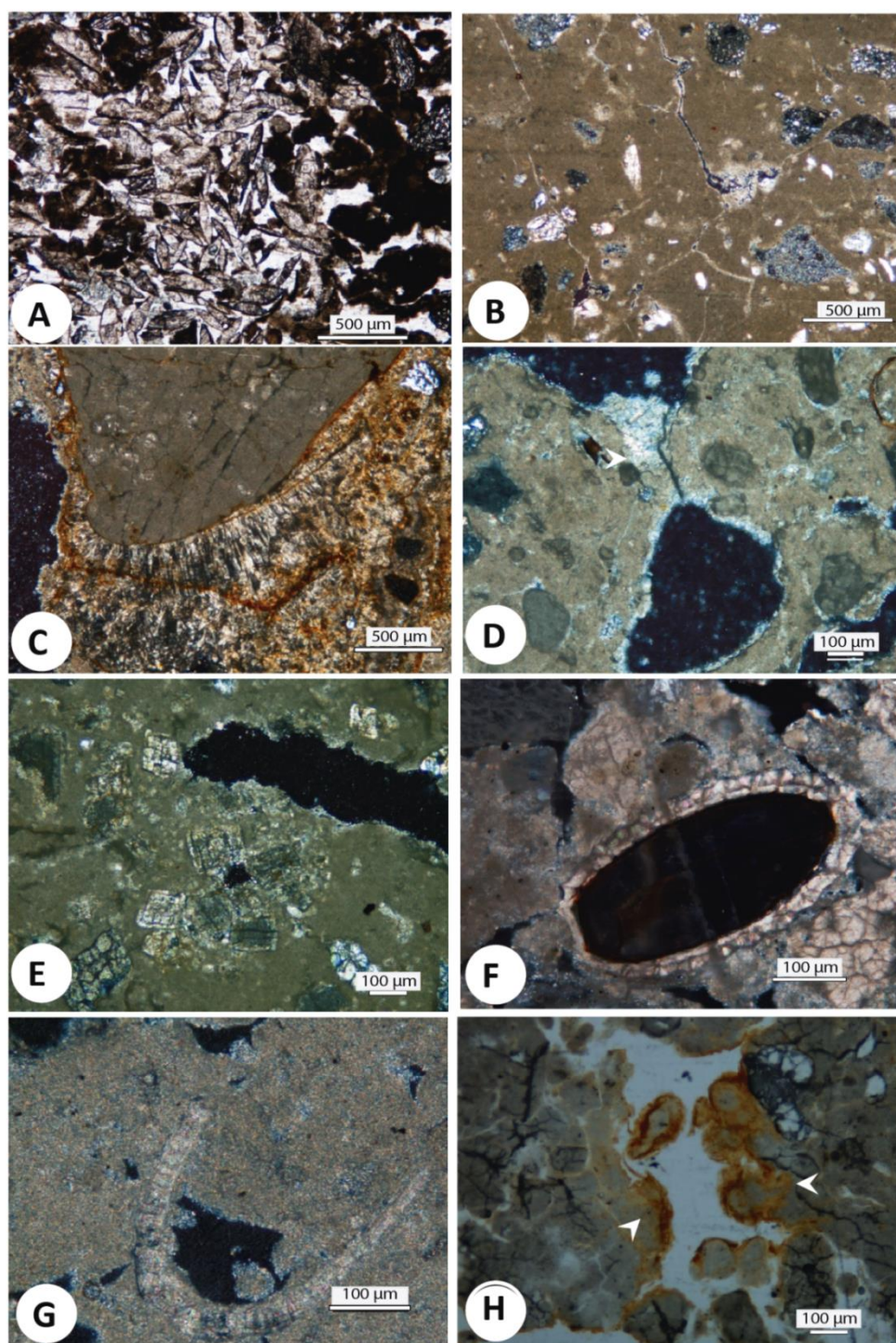


Figure 10. Micromorphological features of palustrine horizons at Gallocanta Lake. A: Lenticular gypsum accumulation and peloidal microstructure (GA19, Ag). B: Blocky microstructure (GA20, 4Cg4). C: Pendant with sequential aggradation and dark rims (GA22 Bwk); D: Calcite-rich groundmass with crystallitic b-fabric and carbonate coatings (GA19, 2Cg2). E: Carbonate crystals (GA20, 2Cg2). F: Charophyte oogonia (GA19, Ag); G: Ostracod shell remains in paleovalley soils (GA22, Bwk). H: Fe-Mn impregnative hypocoatings (GA19, Ag).

5. Discussion

5.1. Soil composition and texture

The soils examined at Gallocanta Lake have a predominantly carbonatic composition (Table 2, Figure 11). The significant differences in CCE between the northern and southern margins of the lake replicate the differences in the carbonate content of samples collected by Calvo et al. (1978) and agree with the observations of Aranzadi (1980). The highest carbonate content (e.g. CCE >60%) occurs in soils of intermediate landscape positions (GA26, GA21, GA20 and GA19), probably because the persistently high, albeit fluctuating, water table favors the accumulation of pedogenic carbonates, including discontinuous cementations (GA21, Figure 9). Following the increased expression of the carbonatic accumulation morphologies in arid environments (Schoeneberger et al., 2012), the petrocalcic horizon of the northern alluvial fan (GA23, Figures 4 and 9) corresponds to the stage IV of pedogenic carbonate development. These oldest soils were described as caliche by Calvo et al. (1978) and as carbonate crust by Aranzadi (1980), and correspond to the IV development stage of Machette (1985). The common occurrence of non-cemented accumulations in the form of soft powdery carbonates or soft-to-indurated nodules (Figure 9) provides evidence of present-day movements of carbonates throughout the landscape. Similar sequence of calcrete development in relation with palustrine environments in distal alluvial fans are described by AlShuaibi and Khalaf (2011) in Kuwait.

The variation in sedimentary processes and pedogenesis influenced the variation in CCE in the soil profile. The surface soil layers had the lowest CCE and clay content (Figure 11, Table 2), in agreement with the observations of Calvo et al. (1978). Horizons with high CCE also have high clay content (Table 2), corresponding to prevailing lacustrine conditions.

In contrast to other saline wetlands in the Ebro Basin (Castañeda et al., 2013a), at the Gallocanta basin the saline soils occur only at the lake floor and in neighboring narrow fringes where the groundwater is strongly saline (Table 1), or at sites with non-saline groundwater but subjected to occasional flooding; e.g., at the inactive beach (GA21). The salinity profiles of the two soils at the lake floor (GA28 and GA29) are similar and indicate a significant increase in salinity in the upper horizons (Figure 8). Soils at the sand barriers and lagoon (GA19, GA20 and GA27) have intermediate salinity (Figure 8), indicating a mixture of pluvial fresh and lacustrine saline groundwater at the lake margins.

The significant differences in the silt content of the two margins are indicated in the cores collected from a similar NE–SW transect by Pérez et al. (2002) (Figure 8), who interpret the silt material as products of small deltaic systems, and Luzón et al. (2007a) indicate the outwashing from torrential flows as a source of the silt material. In the soil profile, the particle-size distribution expressed as synthetic values (Figure 11) allows the

identification of a sandy layer at a mean depth of 100 cm, consistently concordant with the topographic surface at the southern margin. Despite the shallow topographic gradient of this margin, the detrital supply from the Mesozoic outcrops reaches the lakebed with gradually attenuated energy, as sand content decreases from 94% at the margin to 68% at the lake floor. This alluvial material enters the lake probably favored by a low or near zero water level in the lake (i.e., a drought period), and it is not expressed in the soil profile of the sublittoral bar (GA19) because of its intense reworking by SW waves and longshore currents (Figure 6). At the northern toposequence, sandy layers are also recognized (Figure 11), and the shallowest sandy layer of GA27 soil indicates subsequent erosion of the bar due to the erosive character of this lake margin (Figure 4). In addition to the textural changes (Table 2), the stone lines (Figure 9) reveal pedogenic discontinuities (Ruhe, 1959) that are produced by erosional and/or depositional conditions (Brown et al., 2004; Splinter et al., 2005).

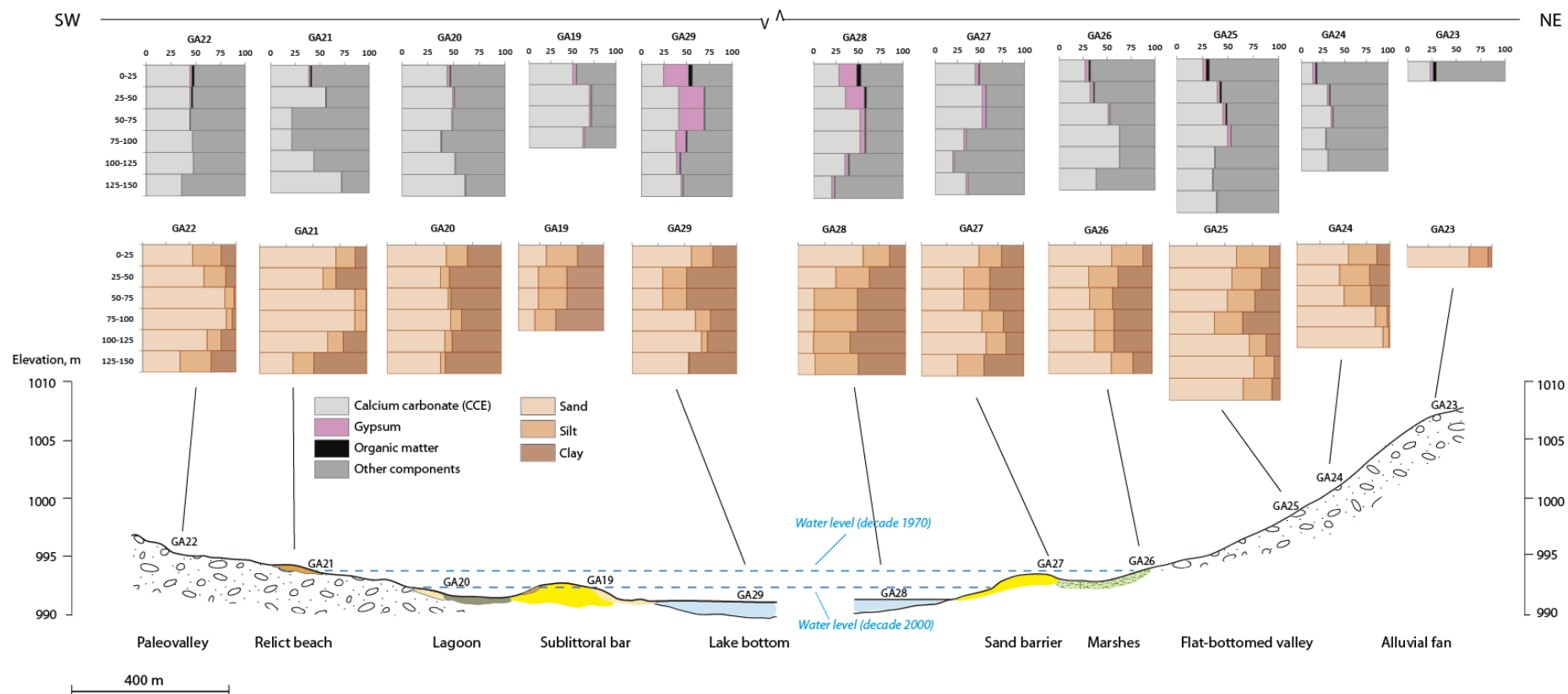


Figure 11. Soil composition along the soil transects at the NW and SW margins of Gallocanta Lake. The topographic profile and the main geomorphological features are indicated.

5.2. Soil hydric conditions along the toposequences

The toposequences at Gallocanta Lake demonstrate a strong correlation between geomorphology and soil distribution, with a progression of Inceptisols to Aridisols towards the lake, and Mollisols at intermediate positions. The periodic saturation experienced by some of the soils examined produces specific pedofeatures of aquic conditions (Vepraskas, 1994; Soil Survey Staff, 2014). The aquic soils (Gypsic Aquisalids) of the lake floor (GA28 and GA29) are submerged during high–water periods and emerged during low–water periods. They remain soaked with highly saline groundwater and are usually impassable (Table 1).

Aquic conditions and shallow groundwater prevail at the SW sublittoral sand bar, 0.4 m above the lake floor, with Typic Aquisalids (GA19).

Fringing the lake, soils are fed by water with half the salinity of the lake bottom (Table 1) and the aquic conditions do not persist. Typic Haplosalids are 2.2 m above the lake floor at the northern sand barrier (GA27) and 0.7 m above the lake floor at the lagoon (GA20). However, the Aquic Calcixerept (GA21) of the southern inactive beach (Figure 6) indicates that aquic conditions reappear at the SW margin because of its low topographic gradient and the lateral supply of fresh groundwater (Table 2).

At the highest landscape positions (Figure 11), under a xeric soil moisture regime, Typic (GA24) and Petrocalcic (GA23) Calcixerepts are in the northern alluvial fans whereas Pachic Calcixerolls develop in the valleys (Figure 4), under former grassland (GA25) and marshes (GA26). The latest soils are favored by the fresh water seepage associated to the lateral groundwater flows from the mountain range, as indicated by the permanent raising of springs, the historical occurrence of non-saline prairies used for cattle grazing (L. XVII, Figure 1 in Hernández-Pacheco and Aranegui, 1926), and the occasional waterlogging of the crops at the end of the valley.

Based on the criteria of Richardson and Vepraskas (2001), the soils at the lake floor (GA28 and GA29), the sandy bars and barriers (GA19 and GA27), the lagoon (GA20), and the inactive beach (GA21) are hydric soils.

5.3. Redoximorphic features and palustrine conditions

Information about redoximorphic processes in carbonate rich soils is scarce. Redoximorphic features can form in soils over several decades (Birkeland, 1999), although their expression can be limited in saline environments (Boettinger, 1977). In the saline and non–saline carbonate soils examined in this study, redoximorphic features are well expressed in the field and are consistent indicators of pedogenesis under subaqueous environment (Durand et al., 2010) and of oxidation and reduction conditions associated with rapid fluctuations of the water table (Lindbo et al., 2010).

Apart from redoximorphic features, other morphologic features of the studied soils, such as matrix color, carbonate content, whole–particle size distribution, and

micromorphological pedofeatures (Figure 10) indicate pedogenesis associated with palustrine conditions (reduced) according to the definition of Jackson (1997), and non-palustrine (detrital, emerged, oxidized) events (Figure 9). On average, palustrine horizons have a small amount of (mean = 6%) coarse fragments, 48% sand content, and a clay/silt ratio of 1.7. In contrast, non-palustrine layers have high chroma (mean 4), high coarse fragments (mean 20%) and sand (mean 57%) content, and a mean clay/silt ratio of 2.2 (7.6 if the lowest GA29 horizon is included). In the soil profile, pedofeatures that reflect palustrine conditions usually occur from the soil surface to various depths (Figure 9). The thickest soil subjected to palustrine conditions is more homogeneous at the NE margin (mean 125 cm) than it is at the SW margin (50 cm – 172 cm, Figure 9).

Non-palustrine (detrital) layers occur systematically beneath the palustrine horizons, except at the lagoon (GA20), where palustrine and non-palustrine layers alternate (Figure 9). The occurrence of palustrine and non-palustrine horizons in the soil profiles indicates a balance between clastic sedimentation supplied by arroyos that reach the lake during summer storms in dry periods, and lacustrine carbonatic deposition under humid conditions during high water level periods. This sequence differed from the one established for closed basins in dry climates (Boettinger and Richardson, 2001), with clastic sedimentation during humid periods and evaporite deposition under dry conditions.

5.4. Evidences of water level fluctuations

Hernández-Pacheco and Aranegui (1926) observed that the water level fluctuations of Gallocanta Lake translate into the retreating of the shoreline by 5–200 m, depending on the topography; however, the oldest available aerial photograph (Figure 12A) taken during the wettest period since 1944, the 1970s (Luna et al., 2014), shows that the lake water invades the shorelines by >700 m. The marshes at the northern margin are inundated, and the chain of islands at the southern margin is partially covered by water. In contrast, recent orthophotographs (Figure 12B) show the lake margin emerged along with gray soils at elevations higher than the present-day lake floor. Those gray soils contrast with the reddish soils of the Ordovician materials and Quaternary alluvial fans. Gray soils must have originated due to the persistence of flooding and inundation patterns, common in palustrine environments, i.e., material growing or deposited in a marsh or marsh-like environment (Jackson, 1997).

The present-day hydrological regime of Gallocanta Lake is not compatible with soils subjected to intermittent flooding or waterlogging at high landscape positions; e.g., at 4.2 m (GA22) and 7 m (GA25) above the lake floor (Figure 11). These soils are landscape indicators of the water level fluctuations and witnesses of the lake retreating during the Holocene. In previous studies, anoxic features are only mentioned at the lake floor (Luzón et al, 2007a). The evidence of palustrine conditions at positions several

meters above the lake agrees with the water levels inferred from paleoclimatic and sedimentological data from core samplings (Comín et al., 1991; Pérez et al., 2002; Rodó et al., 2002; Luzón et al., 2007a).

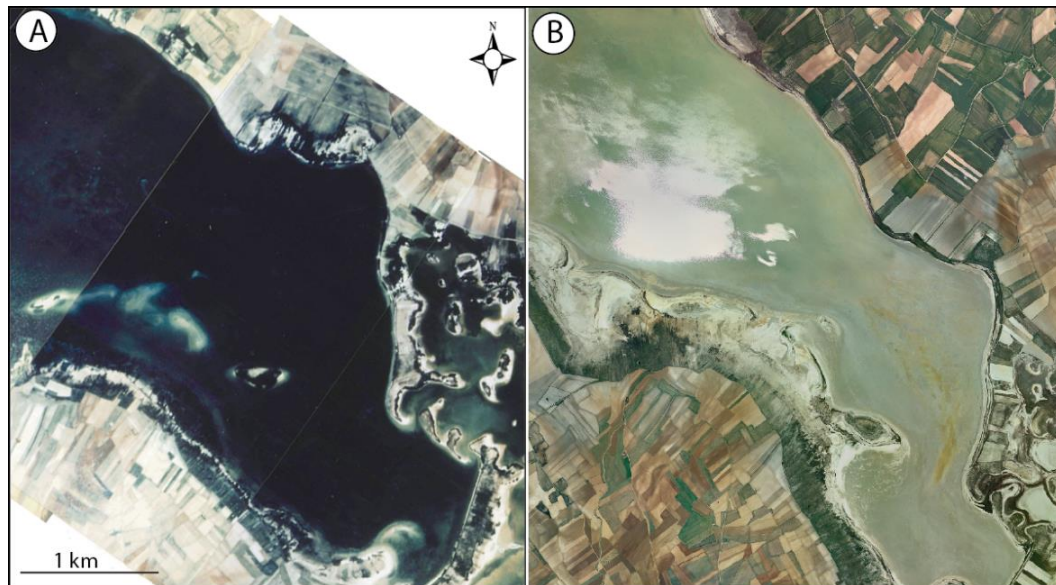


Figure 12. A) Composite aerial contact prints of the central section of Gallocanta Lake, taken in September 1975 (from Pérez, 2014), and B) orthophotograph taken in September 2006.

The piezometric levels in the Gallocanta basin and the water levels recorded in the lake are strongly correlated (García-Vera et al., 2009), which is expected given the pluvial origin of the lake water. Thus, the fluctuations of groundwater level around the lake are expected to occur in concert with the fluctuations of the lake water level.

The soils at the lowest landscape positions around Gallocanta Lake are subjected to hydric variations associated with the present-day fluctuations in the lake water level. The upper layers of the soils in sandy barriers (GA19, GA27) exhibit submersion features (Figure 9) which indicate flooding episodes after their formation as littoral sedimentary bodies. Erosion of the NE barrier island (Figure 4) indicates a flooding episode that was long enough to generate strong littoral currents capable of eroding the lakeward side of this sedimentary structure. The progradation of the SW lake sandy shore and the sedimentary aggradation of the lagoon along the southern margin have promoted a progressive emergence of the southern shore and a decrease in the probability of a repetition of wetting/drying cycles in the future.

At the lake floor (Figure 11), within the first 210 cm of the lake infill materials (Luzón et al., 2007b), pedological features are present to a depth of 90 cm. Similar to other environments where sediments are considered subaqueous soils (Demas and Rabenhorst, 1999), the sediments of Gallocanta Lake can be better understood if studies include an evaluation of soil processes.

6. Conclusions

Geomorphic and edaphic evidence of water level fluctuations were investigated in a shallow, strongly fluctuating, saline lake. Palustrine materials that had signals of past or present flood conditions indicated past hydric conditions that were correlated with lake water level fluctuations. The detailed analysis of the lake margin landscapes and forms provided insights into the prevailing types of processes: erosive, sedimentary–progradational, and sedimentary–aggradational.

The combination of geomorphological and pedological surveys improved the understanding of the soil formation processes and the geomorphological development of highly fluctuating lakeshores. The presence of landscape elements characteristic of littoral and submerged environments which are presently emerged, helped to explain the pedogenesis under palustrine conditions at high and non–flooded topographic positions.

The distribution of saline soils and the salinity gradients indicated the extent of the present–day lacustrine fringe that is subjected to intermittent flooding. In the soil profile, variations in carbonate content and particle–size distribution revealed pedogenic discontinuities that have been conditioned by sedimentological changes at the lake floor and in the surrounding area. The hydric soil indicators confirmed the present soil saturation at different topographic positions, in association with lateral subsurface water flows. Macro and micro soil characteristics (e.g., carbonatic, color spots and redoximorphic) indicated past palustrine conditions at different topographic and geomorphic positions, which were paralleled by the water level fluctuations of the lake during the Holocene and in historical times.

Relationships between soils and geomorphology were evident throughout the toposequences based on the redistribution of carbonate, gypsum, and salts, redoximorphic features, and the taxonomy of the soils. This study identified the early stages of pedogenesis at the lake floor, and that the most complex pedogenesis occurred in the lacustrine fringes that have been exposed to frequent fluctuations in water levels. The lake fringes had the most diverse and complex landscapes, and several inactive, residual forms confirmed the deductions made from the analysis of palustrine soils associated with them. In general, pedogenesis and geomorphology both reflect the trend of Gallocanta Lake towards more prolonged desiccation.

The pedofeatures examined can be used to identify hydric soils, current and past wetland soils, and to understand the pedogenic processes of lacustrine materials in relation to past and present geomorphological processes acting on them. The combination of edaphic and geomorphic investigations in other types of lakes (e.g., non–saline, permanent) or to other types of lacustrine littoral environments (inlets, open wetlands, dunes) will provide valuable information for a better understanding of these complex environments.



CAPÍTULO 5.

Late Quaternary pedogenesis of lacustrine terraces in Gallocanta Lake, NE Spain

Late Quaternary pedogenesis of lacustrine terraces in Gallocanta Lake, NE Spain

Resumen

Los márgenes de la laguna son entornos complejos cuya evolución está fuertemente controlada por la frecuencia y la persistencia de las inundaciones. El desarrollo edáfico de ambientes marginales lacustres puede reconstruirse combinando un análisis geomorfológico detallado con un estudio edáfico sistemático de toposecuencias. Este enfoque se ha aplicado a un conjunto de terrazas lacustres recientes en un área palustre de la Laguna de Gallocanta, Los Lagunazos, en la dirección NO del viento predominante, situada en una zona semiárida al NE de España. Hasta cinco terrazas, de 1.6 a 4.5 m sobre el fondo de la laguna han sido identificadas y cartografiadas empleando la fotointerpretación estéreoscópica y datos LiDAR de altitud. Varios ciclos de fluctuaciones del nivel del agua forman parte de la tendencia general hacia la desecación de la laguna y han generado varios niveles escalonados de terrazas lacustres.

Los suelos de estas terrazas tienen diferentes características morfológicas y proporcionan evidencias de la existencia de una paleolaguna más grande de lo que es en la actualidad. Los suelos tienen una textura franco-arenosa con un contenido variable de arcilla (1% a 46%) y una composición predominantemente carbonatada (media = 26%). Los suelos se desarrollan en una secuencia de capas grises de grano fino rico en carbonatos lacustres (media = 37%) que recubren las capas detríticas (media = 51% de grava) y frecuentemente erosivas, pobres en carbonatos y de color rojizo. La pedogénesis de esta zona palustre se caracteriza principalmente por acumulaciones poco desarrolladas de carbonato y manchas redox asociadas a fluctuaciones del nivel del agua de la laguna, que rejuvenecen o truncan continuamente los suelos. La integración de información sobre características pedológicas y geomorfológicas proporciona una visión de los procesos lacustres recientes y de los procesos de formación del suelo. Esta información facilita las estrategias y planes de gestión para este ambiente salino protegido.

Este capítulo se ha publicado en la revista *Catena*. IF2015: 2.612 (9/34 Soil Science).

Luna, E., Castañeda, C., Gracia, F.J., Rodríguez-Ochoa, R., 2016. Late Quaternary pedogenesis of lacustrine terraces in Gallocanta Lake, NE Spain. *Catena*, 147, 372–385.

Abstract

Transitional areas of lake margins are complex environments whose evolution is strongly controlled by flooding frequency and persistence. The edaphic development of lacustrine marginal environments can be reconstructed by combining detailed geomorphological analysis with a systematic edaphic study of toposequences. This approach has been applied to a set of recent lacustrine terraces in the downwind palustrine area of the Gallocanta saline lake, located in a semiarid area in NE Spain. Up to five terraces, from 1.6 to 4.5 m above the lake bottom, have been identified and mapped using stereo photointerpretation and airborne LiDAR data. Several cycles of water level fluctuations, as part of a general trend towards lake desiccation, have generated stepped terrace levels. The soils of these terraces have different morphological characteristics and provide evidences for the Gallocanta paleolake being larger than that of the present day. The soils have a sandy loam texture with variable clay content (1% to 46%) and a predominantly carbonate composition (mean = 26%). The soils are developed in a sequence of lacustrine carbonate-rich (mean = 37%) fine-grained gray layers overlaying detrital (mean = 51% gravels) and frequently erosive, carbonate-poor reddish layers. The pedogenesis of the downwind palustrine area is mainly characterized by poorly-developed carbonate accumulations and common redox mottles associated with water level fluctuations in the lake, which continuously rejuvenate or truncate the soils. Integrating pedological and geomorphological features provides insight into recent complex lacustrine and soil forming processes and facilitates management strategies and plans for this protected saline environment.

Key words: water-level variations; saline lake; subaqueous soils; Iberian range; Late-Holocene; evolution; basin; geomorphology; fluctuations; records.

1. Introduction

Little is known about wetland soils developed in lake basins under semiarid climates. These soils frequently become seasonally or intermittently dry due to the limited precipitation and high evapotranspiration rates. Along the margins of arid wetlands, soil formation and properties are closely related to geomorphic position and fluctuations in

lake, or playa-lake, water levels (Kolka and Thompson, 2007; Biggs et al., 2010; Farpoor et al., 2012; Shabanova et al., 2015). For this reason the study of wetland soils is always intimately linked to the study of wetland geomorphology and hydrology (Richardson et al., 2001).

Lake margins in semiarid climates are complex environments where sedimentation and soil formation are determined by the balance between detrital inputs during wet seasons and salt deposition during dry conditions (Boettinger and Richardson, 2001). In the wetting-drying margins of the lake, water action on soils strongly influences their characteristics such as texture, color, and types of horizons (Richardson et al., 2001). In this context, the study of soils provides evidence of recent and past water level fluctuations in the lake (Castañeda et al., 2015), and may be used for identifying regulatory boundaries (Lichvar et al., 2006). If high lake water periods are long enough, they favor the generation of a morphosedimentary marginal surface of mixed sedimentary-edaphic origin which can be abandoned and left perched once the lake level drops again (Romanovsky, 2002). This is the origin of stepped lacustrine terraces in lakes that experience a progressive desiccation trend (Gracia, 1995; Landmann and Reimer, 1996), as is the case of Gallocanta Lake. Water level fluctuations in lakes are common in the arid and semiarid Mediterranean region where most lakes are shallower (Beklioglu et al., 2007) and more sensitive to climate oscillations than in more humid areas. Lake water level fluctuations during the Late Quaternary have received much attention as proxies for identifying past environmental changes, usually based on sedimentology (Ghinassi et al., 2012; De Cort et al., 2013; McGlue et al., 2013) together with paleoecological evidence (e.g., pollen, ostracods, diatoms) (Shuman et al., 2001; Hoffmann et al., 2012).

Although classic geomorphological studies of lakes focus on the different lake morphologies in order to understand their origin and general evolution (Timms, 1992), few studies have investigated the geomorphology of lacustrine terraces in shallow lakes and most of these studies have looked at Pleistocene terraces related to major climatic oscillations (Bowman, 1971; Stine, 1990; Abu and Kempe, 2009; Ocakoglu et al., 2013). Only isolated contributions relate the distribution and elevation of Holocene lacustrine terraces to recent climate changes (Romanovsky, 2002; Gutiérrez et al., 2013). In fact, when compared to Pleistocene terraces, Holocene historical levels are usually close to present water levels and hence their study requires a very detailed high-resolution topographic analysis to distinguish different historical and recent terrace levels, not often affected by present flooding.

Recognition of such lacustrine terraces and associated past flooding events requires geomorphological and topographical techniques. Hence, lake terrace formation and the interaction between lacustrine and pedogenetic processes can be reconstructed by combining detailed geomorphological analysis and a systematic edaphic study of toposequences. This kind of quantitative analysis is feasible with modern topographic techniques like airborne LiDAR surveys and the digital terrain models derived from them,

together with GIS software (Jones et al., 2008; Budja and Mlekuž, 2010). High-resolution LiDAR-derived digital elevation models have been widely applied in coastal areas (Kim et al., 2013; Matsu'ura, 2015) and fluvial systems with subtle topography (Jones et al., 2008). The present study focuses on soil development in lacustrine terraces that are assumed to have been intermittently exposed during Late Quaternary-historical times, in the Gallocanta saline lake, NE Spain. The aim is to integrate pedological and geomorphological features to reconstruct the lacustrine terraces formation and understand recent lacustrine and soil formation processes associated with water level fluctuations.

2. Gallocanta Lake

2.1. General setting

Gallocanta Lake is the largest well-preserved saline lake in Western Europe and has been included in the Ramsar list since 1994 (Ramsar Convention Secretariat, 2010). The area comprises a 6477 ha natural reserve that is protected and managed by the local government in order to conserve endemism as well as habitats for the overwintering of migratory birds (Leránóz and González, 2009). The lake, formed at the bottom of a karst polje (Gracia et al., 2002), is located in a 543 km² endorheic basin at approximately 1000 m.a.s.l. in the Iberian Chain, NE Spain. The basin holds more than 20 lakes of karstic origin, Gallocanta Lake being the largest. The Gallocanta Quaternary basin is elongated in the dominant wind direction (NW-SE), parallel with the Valdelacasa mountain range, which runs along the NE side of the basin with peaks of up to 1400 m.a.s.l. (Figure 1). This mountain range is composed of siliceous Ordovician rocks and flanks an extensive outcrop of deformed carbonate units from the Mesozoic (Gracia, 2014). The basin is excavated into Triassic clays and gypsum, as well as other more soluble salts (Gracia, 2009) which contribute to the soil and water salinity. The center of the lake contains about 1 m of lacustrine sediments, the oldest of which have been dated as 43 ky BP (Rodó, 1997). Sediment cores were analyzed for reconstructing Late Quaternary paleoenvironmental and paleoclimatic changes by Schütt (1998), Rodó et al. (2002) and Luzón et al. (2007a), as well as other authors.

The climate is dry semiarid (Liso and Ascaso, 1969) and there is a large yearly variation in rainfall; the mean annual precipitation over the last 70 years is 488 mm yr⁻¹ (range = 791 mm in 1959 to 232 mm in 2001), and the mean annual temperature is 11.3 °C for the period 1969–2012. The frequent NW winds (Figure 1) exacerbate the hydric deficit (Martínez-Cob et al., 2010) and produce longshore currents to the SE, generating shoreline landforms similar to those of marine coasts (Castañeda et al., 2013a). Water level fluctuations constitute the most outstanding feature of the lake. The maximum lake

water level, 2.84 m, was registered in 1974 (Pérez-Bujarrabal, 2014) and the lake desiccates completely during periods of low rainfall.

2.2. Downwind palustrine area

The SE sector of the lake, or downwind palustrine area, is approximately 500 ha in size and is the largest area of the lake, where sediments and water accumulate during extraordinary flooding events (Figure 1). This sedimentary plain, though flat in appearance (slope <1%), has preserved lacustrine and coastal landforms which can be seen from aerial photographs due to the vegetation and soil patterns. The plain is dominated by alternating flooding and drying periods that lead to changes in soil salinity and moisture. The soil moisture regime around Gallocanta Lake is xeric but soils subjected to frequent flooding have aquic soil moisture regime (Castañeda et al., 2015). Historically, soils have been subjected to longstanding flooding (Comín et al., 1983; Pérez-Bujarrabal, 2014) though at present most soils are exposed for long periods and are subjected to either erosion or sediment transport under aerial conditions.

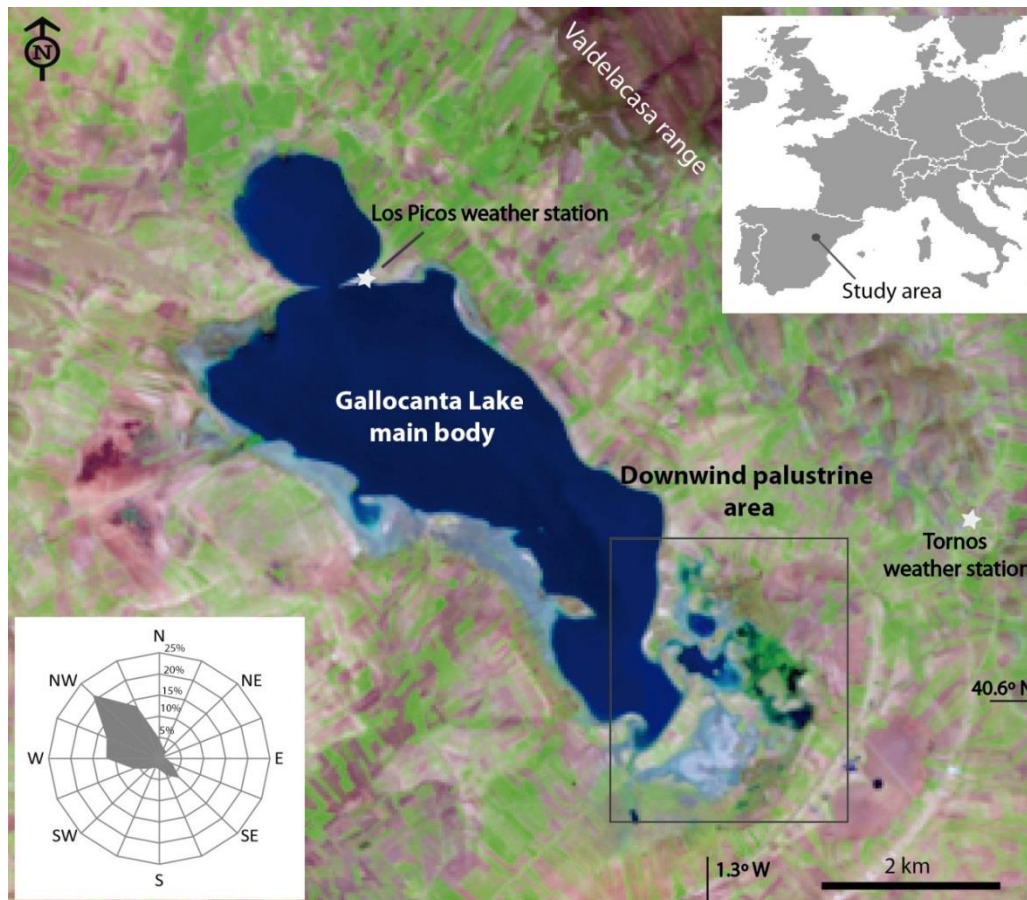


Figure 1. False color composition (RGB 543) of a Landsat 5TM image (from the U.S. Geological Survey) acquired on 14/04/1987 showing Gallocanta Lake and its downwind palustrine area partially flooded. The nearest weather stations, Los Picos and Tornos, are

marked. The wind rose shows the relative frequency and direction of the moderate (2.0 to 5.0 m s^{-1}) winter winds measured at a height of 2 m (modified from Martínez-Cob et al., 2010).

The small topographic variations and mixing of saline groundwater with fresh surface water from runoff favor the preservation of a large area of protected habitats with an intricate distribution of shallow ponds (Figure 1), halophytic and non-saline communities, mainly rushes and reed beds. Winter cereal and other subsidized crops provide safe sites for the feeding and nesting of protected birds. Low-lying saline areas stand as bare soils or are colonized by annual and perennial halophytes, some of which include protected species such as *Limonium* sp. and *Puccinellia pungens*. *Limonium* sp. is part of a priority habitat (1510 Mediterranean salt steppes) and *P. pungens* is endemic (Gómez et al., 1983), being included in Annex II of the Habitat Directive and in Appendix I of the Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Moreno, 2013).

3. Material and methods

Geomorphological photointerpretation was performed using aerial photographs from 2006 printed at 1:15 000 scale. The aerial photographs were taken in summer, when there was no standing water in the lake. Field inspections were crucial for confirming the geomorphological map, which was then transferred to orthophotographs and managed within the geographic information system ArcGIS®. Orthophotographs from the 2009 and 2012 dry seasons were overlain to contrast the stereo photointerpretation.

A digital elevation model (DEM) generated from airborne LiDAR data with an absolute vertical accuracy of 0.20 m and a density of 0.5 points per square meter, was used to complement the geomorphological photointerpretation. The elevation model was managed in ENVI® and ArcGIS® for interactive histogram stretching and elevation data statistics. The average elevation for each terrace was computed using the median value, as this is more robust than the mean value in non-Gaussian distributions.

Soil sampling was based on the geomorphological map together with vegetation type and pond distribution. Pits were dug during dry periods (zero lake water level), in May, June and August 2013, and August 2014. A total of nine pedons were studied, located along two toposequences oriented NW-SE and NE-SW (Figure 2), which are parallel and perpendicular, respectively, to the direction of the prevailing winds and the main axis of Gallocanta Lake (Figure 1). The toposequences have a maximum difference in elevation of 1.2 m and 2.3 m , respectively. A soil sample was collected from each horizon identified in the soil profiles, making a total of 53 soil samples. Groundwater samples were collected from the pits where the water table was reached.

Soil profiles were described following Schoeneberger et al. (2012), and genetic and diagnostic horizons and soil classification were based on Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). The soil samples were air-dried and sieved to < 2 mm for subsequent laboratory analyses. Soil salinity was measured as the electrical conductivity of the saturated paste extract, E_{Ce} (MAPA, 1994), using a conductivity cell (Orion 013605MD) and expressed in dS m⁻¹ at 25 °C; pH of the 1:2.5 soil:water extract of the soil was measured using a pH electrode (Orion 9157BNMD). Calcium carbonate equivalent, CCE, was measured by gasometry (MAPA, 1994). Organic matter, OM, was determined by chromic acid digestion (Heanes, 1984) with a UV/V UNICAM 8625 spectrophotometer; and particle size distribution was assessed by laser diffraction with a correction for the clay value following Taubner et al. (2009). The gypsum content was determined using thermogravimetry (Artieda et al., 2006) and confirmed with the qualitative test (Van Reeuwijk, 2002) for gypsum content < 2%. The ionic content (Na, Ca and Mg) of saturated paste extracts was analyzed using an ionic chromatograph (Metrohm 861 Advanced compact IC) (APHA, 1989). The pH and EC of the groundwater samples were measured (MAPA 1994) with a pH electrode (Orion 9157BNMD) and a conductivity cell (Orion 013605MD), respectively. In order to compare different properties of the soil profiles according to depth, proportions of E_{Ce} and the sand, silt and clay content were calculated at soil depth intervals of 25 cm (Castañeda et al., 2012). The original 53 soil samples resulted in 63 synthetic soil layers of 25 cm thickness.

Rainfall data recorded since 1944 at Tornos weather station (Figure 1), were complemented with data from nearby weather stations using monthly regressions (Luna et al., 2014). Normal years were identified from mean annual precipitation (Soil Survey Staff, 2014).

4. Results and discussion

4.1. Distribution of the lacustrine terraces

The downwind palustrine plain, isolated from the main lake bed by natural barriers, is delimited by alluvial fans formed at the foot of the mountain range (Figure 1) and by Pleistocene lacustrine coastal sediments on the eastern fringe (Figure 2). These ancient deposits, studied previously by Gracia and Santos (1992), form a high plain more than 5 m above the study area. The plain is 506 ha in area and is primarily composed of a sequence of five stepped lacustrine terraces, T0 to T4, whose elevation ranges between 1.6 and 4.5 m above the lake bottom (Table 1). The five terrace levels show a fairly concentric distribution, decreasing in elevation towards the center of the palustrine area. They form flat to gently undulating surfaces limited by slopes, often forming low subvertical escarpments or microcliffs. From a sedimentological point of view the plain belongs to the functional palustrine area defined by Pérez et al. (2002). Although some

terrace levels are recognized in other littoral zones of the lake at equivalent heights, they are usually small and present incomplete sequences, whereas the downwind area shows the most complete succession of terrace levels.

Table 1. Selected metrics of each of the five terraces as obtained from LiDAR data. C.V: coefficient of variation.

Terrace	No. patches	Elevation, m a.s.l.				Surface		Elevation difference m	
		Max	Median	Min	CV	ha	%	Between terraces	From lake bottom
T4	12	1000.2	995.8	992.9	0.12	173.7	34	1.6	4.5
T3	21	997.2	994.2	992.8	0.06	128.8	25	0.5	3.0
T2	14	995.7	993.7	992.4	0.04	90.3	18	0.7	2.5
T1	6	994.6	993.0	992.2	0.03	60.9	12	0.2	1.8
T0	6	993.7	992.8	992.1	0.03	52.3	10		1.6

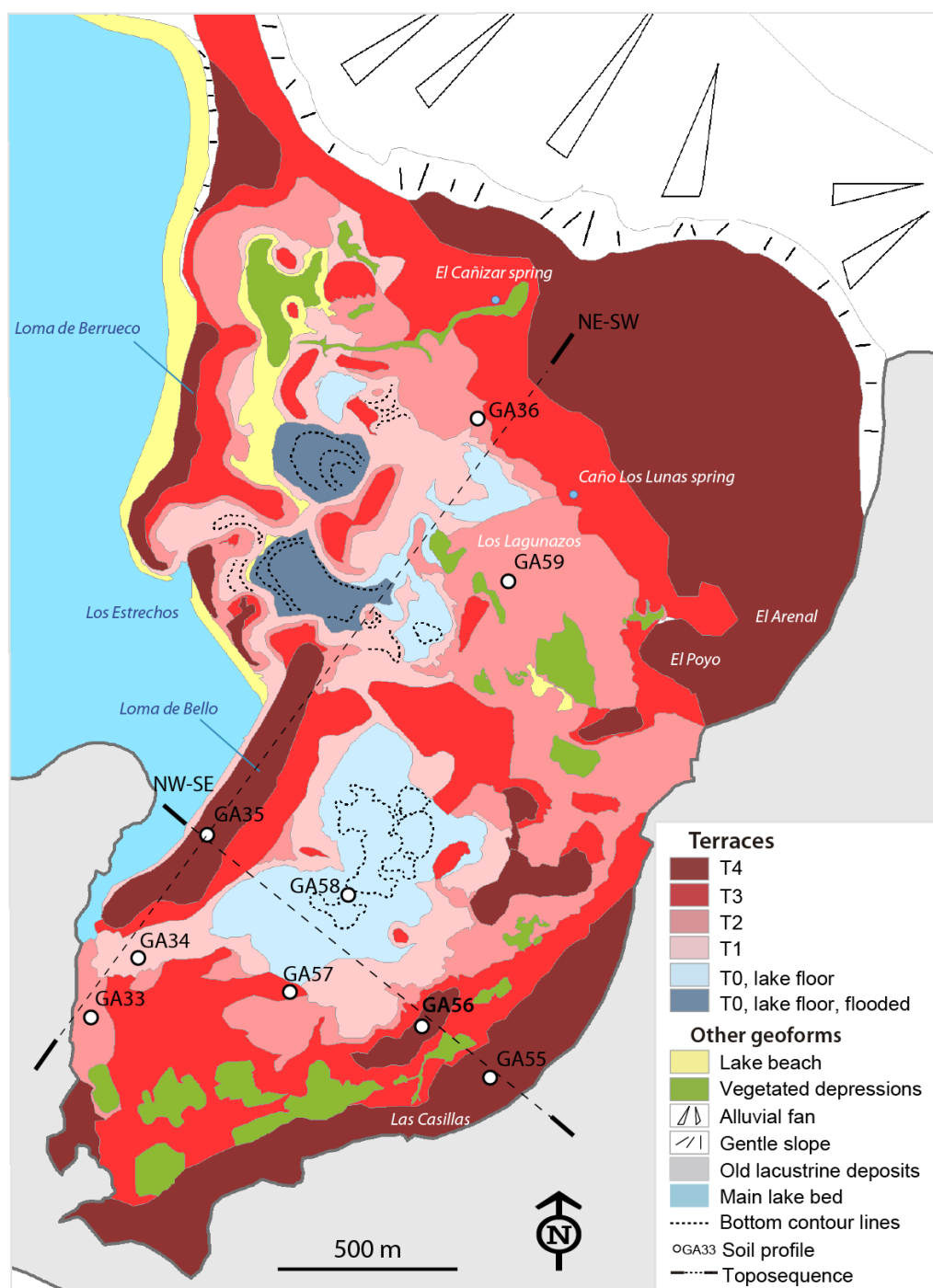


Figure 2. Geomorphological map of the downwind palustrine area of Gallocanta Lake (see Figure 1 for general location). The nine soil profiles of the two soil toposequences studied, NW–SE and NE–SW, are marked.

The median elevation for each of the five terraces represents a robust marker for the successive infilling steps in the palustrine area (Figure 3). The upper terraces, T4 and T3, are well differentiated from the lower terraces, T1 and T0. T2 is a transitional terrace between the upper and lower levels. T3 is inset in the previous level surrounding the palustrine depression and has the most fragmented distribution (Table 1). T2 is much more connected than the upper terraces and, finally, the lower terraces T1 and T0 are fairly continuous, with only six separate patches (Table 1). T1 extends around the youngest terrace, T0, which comprises a cluster of several ponds and bare floors that connect when flooded. T0 corresponds to the current local lake floor of the palustrine area.

The coefficient of variation for the elevation confirms higher dispersion for the upper terraces, especially T4 (Table 1). The slightly skewed distribution of the histograms (Figure 4) and the presence of shoulders can be interpreted as terrace degradation or as different subsurfaces corresponding to minor episodes of water level drop. Surface erosion, minor mass movements on escarpments, and agricultural practices on the higher terraces have all contributed to their topographic variability.

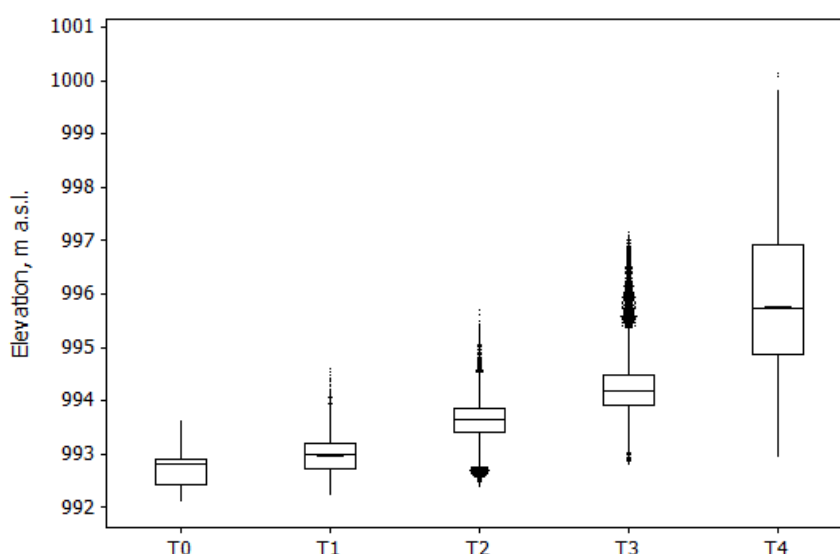


Figure 3. Boxplots of elevation for the five stepped terraces forming the downwind palustrine area of Gallocanta Lake, obtained from LiDAR data. Interquartile range box, medians and their confidence intervals, and outliers are represented.

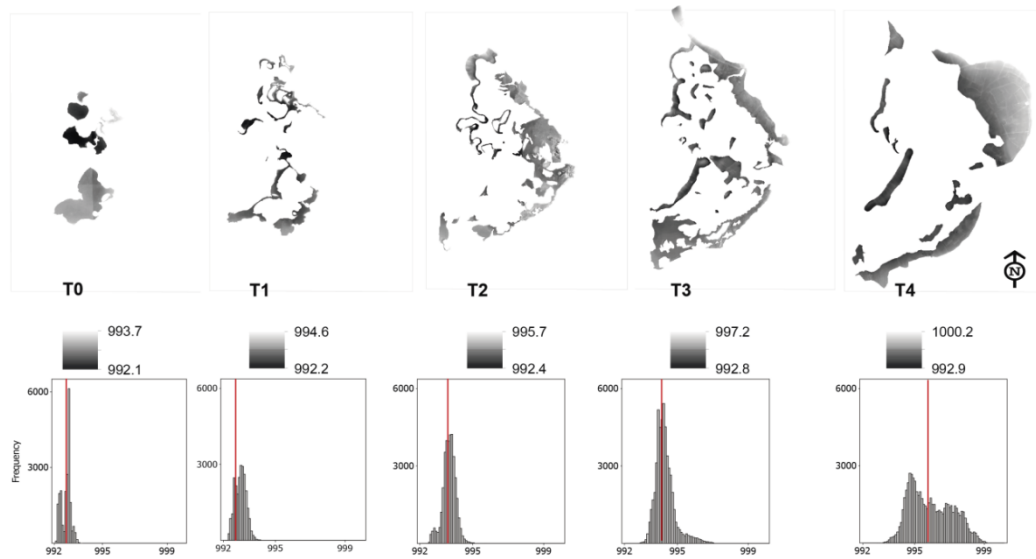


Figure 4. Terrace topography extracted from LiDAR DEM (see Figure 2 for scale) and the corresponding histograms showing the median (red vertical line).

4.2. Geomorphological processes of terraces formation

The highest terrace level, T4, forms a set of NNE-SSW oriented barriers (Loma de Berrueco – Los Estrechos – Loma de Bello), which virtually isolate the downwind plain from the main lake body (Figure 2). This terrace level also defines the outermost fringe of the plain and a group of minor NE-SW aligned islands, which have the greatest extent of all terrace levels present in the zone (Table 1). The roughly circular distribution of the T4 level confines a sub-parallel string of depressions (Figure 2) where vegetation denotes the persistence of soil moisture. The generation of the T4 terrace is associated with sediment accumulation due to the phenomenon of wind-generated wave dissipation that occurs in shallow lakes oriented parallel to prevailing winds, leading to lake segmentation (Zenkovich, 1967; Lees, 1989). Lees and Cook (1991) proposed a conceptual model for the generation of transverse lake barriers and downwind lunettes on shallow lakes, which fits Lake Gallocanta fairly well.

In an initial stage of lake level stillstand, unidirectional winds blowing from the NW would have generated waves that interacted with the lake bed to transport sediments towards the SE. In a second stage, interaction between waves, the shoreline beaches and migrating bedforms would have led to the construction of a growing bank at a given distance downwind. The morphology of the Loma de Berrueco barrier (Figure 2) suggests the prevailing wave-induced currents moved clockwise. Residual currents flowing to the SE would have built the second, Loma de Bello, barrier and the minor spits of Los Estrechos (Figure 2).

After the generation of the T4 terrace, the Loma de Berrueco – Loma de Bello barrier semi-enclosed a downwind basin, only connected with the main lake body through the Los Estrechos inlets. The subsequent water level drop during the Holocene produced a progressive base level fall and the generation of the different lacustrine terrace levels, T3 to T0. The distribution of T3 parallels that of T4 and denotes continuity of the geomorphic processes promoting terrace formation. Level T3 significantly segments the plain into two main low-lying basins, Los Lagunazos to the NE and the Loma de Bello – Las Casillas basin to the S (Figure 2). Some remnants of the T3 and T4 terraces display a recurved shape associated with the prevailing longshore currents, which flow to the SE, as can be recognized in other littoral zones of the lake (Gracia, 1995).

The 160 cm difference in elevation between T4 and T3 is relatively very high indicating a noticeable water level drop in the paleolake. However, the areal extent of T4 is relatively large, 34% of the total palustrine zone, suggesting a substantially stable period of high water level leading to widespread sedimentation. Another lake regression occurred after T3 and these deposits were probably more deeply eroded resulting in a lower difference in elevation between consecutive terraces: 50 cm on average. A subsequent lake regression occurred when T1 began to develop, leading to 70 cm of difference in elevation between T2 and T1 (Table 2 and Figure 5). Finally, the last lake regression responds to a minor lake level fall of 20 cm, although this last step is very decisive because it culminated in the almost complete enclosure of the palustrine area. From this moment onwards, the downwind palustrine area has been almost isolated from the main lake body by terrace T4, with a water inlet at the southernmost point of the Loma de Bello barrier (Figures 2 and 5). The occasional entrance of water through this narrow gap can be demonstrated with Landsat images taken during wet seasons (Figure 1). The five lacustrine terrace levels provide evidence for the larger extent of the preceding Gallocanta paleolake. Other examples of geomorphological evidence for lake retreat in semiarid environments across the globe are mentioned by authors including Bowman (1971), Abuodha (2004), Timms (2006), Abu and Kempe (2009), and Chen et al. (2013). Luzón et al. (2007a) studied sediment cores from Gallocanta Lake and deduced a postglacial maximum lacustrine level (4–10 m) at around 8010 yr BP, coinciding with a relatively humid period at the beginning of the Holocene, as has also been recorded in other Spanish lakes. A progressive water level decrease followed this episode, although with important fluctuations. A recent period of increased humidity was identified for the mid-19th century by Schütt (1998) and Luzón et al. (2007a).

In a situation of progressively falling water levels, the new lower level would impose new dynamic conditions on the abandoned terrace deposits, and would probably involve their partial erosion due to undercutting by waves, as well as runoff. Therefore, as Bowman (1971) and Flower and Foster (1992) deduced from similar lacustrine features in

other lakes, the development of a lacustrine terrace also brings about a change in the earlier levels due to the backwearing process.

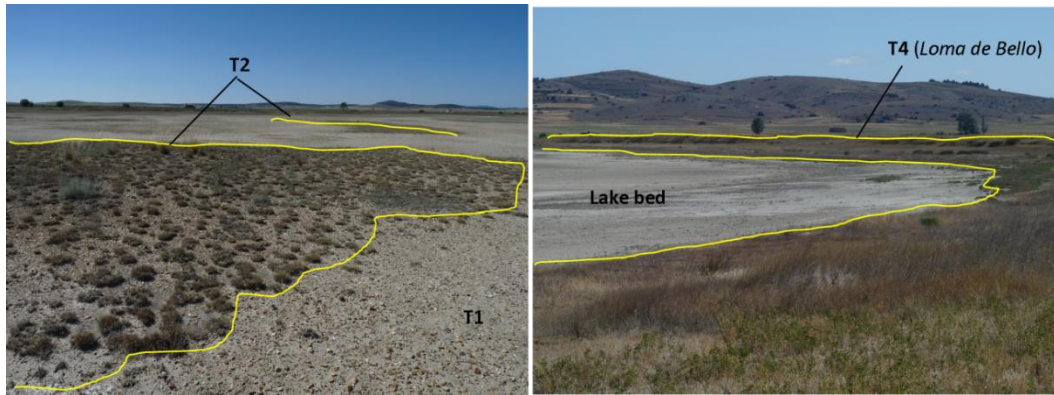


Figure 5. Photographs taken during dry seasons showing the terraces of the palustrine area of Gallocanta Lake at different scales.

4.3. Main characteristics of the soils and groundwater

The soil depth ranges from 120 cm to 210 cm and is mostly limited by the presence of groundwater. The general sequence of horizons is A-B-C with the exception of GA33 and GA34. In these cases the A-C sequence is probably related to their proximity to the water and sediment inlet from the main lake (Figure 2). The thickness of the A horizon ranges from 4 to 45 cm and weathered B horizons occur only in densely vegetated areas or in crop fields. The main diagnostic horizons are Ochric, Calcic, Salic, and Cambic (Soil Survey Staff, 2014). There is a progression from Inceptisols in the intermediate and upper terraces, formed under a xeric soil moisture regime, to Aridisols in the lower terraces, where both strong salinity and aquic conditions prevail (Soil Survey Staff, 2014). In general the soil profiles show two main distinct matrix colors, gray (mostly 2.5Y) and reddish (10YR, 7.5YR and 5YR, Table 3); these colors principally correspond to surface and subsurface horizons, respectively. Most soils in the area, based on the sequence of horizons (Birkeland, 1999), are moderately developed.

Groundwater was reached at depths of between 90 and 200 cm (Table 2), and displayed no relationship with the terrace levels or distance from the depocenter. The shallowest water table was found at the outermost site of the SW–NE transect (GA36), suggesting influence of lateral water flowing from the adjacent alluvial fan and mountain ranges. In general, the groundwater is very saline in the lower terraces, with EC up to 106 dS m⁻¹ in GA58, three times saltier than the sea. At the outermost fringe of the plain (GA36 and GA55) the groundwater is non-saline (Table 2).

Saline groundwater is magnesium chloride type, similar to the surface water of the lake during low water level periods (Comín et al., 1983), whereas fresh groundwater is magnesium bicarbonate type. Saline and non-saline groundwater are largely enriched in

magnesium, with an Mg/Ca ratio of 30.8 in saline water and 8.7 in fresh water (Table 2). This Mg enrichment is probably related to the precipitation of carbonates, as found by Renaut (1990) in semiarid lakes. The predominantly bicarbonate composition of the groundwater preserves the moderately and strongly alkaline pH of soils.

Table 2. Physical properties and main ions of the groundwater in the downwind palustrine area of Gallocanta Lake.

Sample	Depth cm	pH	EC dS m ⁻¹	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
meq L ⁻¹											
GA33	155	7.3	87.1	989.6	32.1	756.7	3.6	721.8	991.2	10.0	63.2
GA34	130	7.3	83.0	736.2	34.2	709.4	5.7	526.5	1029.6	2.0	6.9
GA36	90	8.2	4.9	32.0	3.7	29.5	0.6	31.8	18.9	16.0	0.0
GA55	168	8.5	1.3	8.2	4.4	2.9	0.1	5.3	3.3	12.0	0.7
GA57	200	7.5	66.9	611.8	41.9	553.0	4.9	474.4	795.4	7.0	2.0
GA58	180	7.1	106.0	1083.4	36.0	1058.7	12.2	696.5	1545.4	5.0	4.7

4.4. Soil composition and texture

The soils of the palustrine plain are neutral to strongly alkaline and have <2% organic matter (OM) (Table 3). The minimum content of OM corresponds to the scarcely vegetated youngest terrace, T0. Carbonate composition (mean CCE of 32.5%) predominates down to a depth of 50 cm in the lower terraces and down to a depth of 100 cm in the upper terraces (Table 3). Below these depths the soil horizons are generally carbonate-free. Considering only carbonate horizons, the soils at the center of the plain have a lower carbonate content (mean CCE 24.1%) than soils in the outermost area (mean CCE 34.7%). Previous studies focusing on the soil surface, have given similar carbonate contents (Calvo et al., 1978; Aranzadi, 1980).

Unlike the soils and sediments at the bottom of the main lake (Comín et al., 1990; Luzón et al., 2007a; Castañeda et al., 2015), the palustrine soils are low in gypsum, with usually <5%, with the exception of the T0 topsoil (gypsum 9%) (Table 3). Remarkably, 16% gypsum was found below 2 m at Loma de Bello. This deep gypsum-rich layer could be associated with an evaporitic environment suggesting a predominantly lacustrine origin for this barrier.

Table 3. Physical and chemical properties of the nine soils studied.

*: Augher sampling. L: lacustrine, D: detritic, SL: semi-lacustrine; ECe: electrical conductivity of the saturation extract; SAR: sodium adsorption ratio; Mg/Ca: ratio in equivalents; pH: measured on the saturated paste; CCE: calcium carbonate equivalent; OM: organic matter; Rock fragments: weight percent. - Not determined.

Depth	Horizon	Sediment	Munsell Color		ECe	SAR	Mg/Ca	pH	CCE	Gypsum	OM	Rock fragments	Sand	Silt	Clay	Silt/Clay	USDA Textural class
cm			Matrix	Mottles	dS m ⁻¹				%								
GA33 Typic Aquisalid																	
0-21	Az	L	2.5Y 5.5/3		27.2	18.6	6	8	34.6	2.7	1.4	15.3	70.8	20.2	9	2.2	Sandy loam
21-28/39	Cz	SL	2.5Y 6/3	7.5YR 5/8	38.6	22.6	14.1	8.2	32	<2	0.2	52.3	87.2	12.2	0.6	20.3	Sand
28/39-54 top	2Cz	L	7.5YR 7/4		51.1	25.3	16	8.2	32.4	<2	0.1	15.3	56.8	17.9	25.3	0.7	Sandy Clay loam
28/39-54 down	2Cz	L	2.5Y 8/3		44.7	23.5	14	8.2	48.4	2.4	0.2	6.3	50.2	7.2	42.6	0.2	Sandy Clay
54-160	3Cgkz	D	10YR 6/6	7.5YR 2.5/1 and 5Y 7/4	40.7	22.3	13.9	8	4.7	2	0.1	40.7	59.4	24.5	16.1	1.5	Sandy loam
GA34 Typic Aquisalid																	
0-8/10	Az	L	5Y 5.5/2		37.8	23.5	5.5	8.2	27.5	3	0.5	3.0	62.3	29.4	8.3	3.5	Sandy loam
8/10-25/30	Cz	L	2.5Y 7.5/2	2.5YR 7/4	37.8	24.1	12.1	8.4	36.2	<2	0.3	5.6	49	34	17	2	Loam
25/30-70	2Cgkz	D	10YR 6/6	2.5Y 7.5/4, 2.5Y 6/3 and 10YR 6.5/6	45.4	27.7	16.1	7.9	12.4	<2	0.1	41.0	70.8	18.4	10.8	1.7	Sandy loam
70-117/120	3Cgz	D	7.5YR 5.5/6		44.7	26.2	13.5	7.6	<2	<2	0.1	72.6	70.5	21.4	8.1	2.6	Sandy loam
117/120-135	4Cz	D	5YR 4/6		59.7	31.8	12.8	7.5	<2	<2	0	28.1	91.5	8.3	0.2	41.5	Sand
GA35 Typic Haploxerept																	
0-20	Ap1 and 2	L	2.5Y 5/2		0.5	0.3	1.4	8	42.7	3.4	1.3	0.8	61.3	22.5	16.2	1.4	Sandy loam
20-37	Bw1	L	2.5Y 6/2		0.4	1	2.3	8.5	43.2	3.4	0.7	0.4	45.8	30.2	24	1.3	Loam
37-70	Bw2	L	2.5Y 5/3		2.5	4.8	4	8.2	35	3	0.6	0.3	52.5	34.9	12.6	2.8	Sandy loam
70-100	2Aby	L	2.5Y 4/2	10YR 4/1 and 10YR 7/5	10.4	10.4	4.8	8.1	25	2.4	0.4	0.8	50.4	35.7	13.9	2.6	Loam

Table 3. (cont.). Physical and chemical properties of the nine soils studied.

Depth	Horizon	Sediment	Munsell Color		ECe	SAR	Mg/Ca	pH	CCE	Gypsum	OM	Rock fragments	Sand	Silt	Clay	Silt/Clay	USDA Textural class
cm			Matrix	Mottles	dS m ⁻¹				%								
100-150	2Cgy1	L	2.5Y 6/6	10YR7/7 and	16.5	11.7	3.4	8.1	39.6	2.1	0.1	0.1	41.6	32.6	25.8	1.3	Loam
150-210	2Cgy2	L	2.5Y 7/3.5	10YR 7/7	22.6	14.2	3.8	7.9	33.2	2.4	0.1	0.6	40.8	39.3	19.9	2	Loam
210-250	*	L	-		24.1	15.1	3.7	7.8	25.3	16	0.1	0.0	65	26.7	8.3	3.2	Sandy loam
250-270	*	L	-		20.1	12.9	3.4	7.9	37.8	7.5	0.1	9.9	46.5	15.9	37.6	0.4	Sandy Clay
270-290	*	SL	-		16.4	11.2	3	7.8	34.8	<2	0.1	20.9	55.1	20.6	24.3	0.8	Sandy Clay loam
290-320	*	L	-		15	10.8	3	7.8	37.7	<2	0.1	3.1	43.9	25.1	31	0.8	Clay loam
320-350	*	L	-		15	10.5	2.8	7.5	38.7	3.1	0.1	9.0	52.3	23.7	24	1	Sandy Clay loam
GA36 Typic Calcixerept																	
0-45	A	L	2.5Y 4/2		1	2.7	4.3	8.5	26.7	4	2.5	0.9	49.7	30.4	19.9	1.5	Loam
45-57	AB	L	2.5Y 5/1	10YR 6/6	2.7	10.3	12.8	8.7	49.5	2.2	0.4	0.0	35.3	37.3	27.4	1.4	Clay loam
57-80	Bwgk	L	10YR 6/4	2.5YR 5/1	2.4	0	7.2	8.5	47.9	<2	0.3	0.1	26.6	37.1	36.3	1	Clay loam
80-120	Ck	L	10YR 7.5/3	10YR 6/6	3.4	7.4	5.8	8.4	63.8	<2	0.1	1.6	76	11.5	12.5	0.9	Sandy loam
GA55 Typic Calcixerept																	
0-23	A1	L	7.5YR 4/2		1.7	1	12.3	8.6	30.8	4	3.2	0.0	82.2	14	3.8	3.7	Loamy sand
23-40	A2	L	10YR 4.5/2		1.7	2.8	11.9	8.5	30.3	0	1.1	5.5	71.5	22.4	6.1	3.7	Sandy loam
40-75	2Bgk	L	2.5Y 7.5/3	2.5Y 7/8	0.9	1.3	1.9	8.2	50.9	0	0.6	0.5	64.9	13.7	21.4	0.6	Sandy clay loam
75-95/105	3Bk	SL	10YR 6.5/6		0.9	0.8	1.2	8.1	29.9	0	0.2	38.9	83.7	8.1	8.2	1	Loamy sand
95/105-118/127	4C	D	7.5YR 5/8	5Y 6/2	0.2	0.6	1	8.3	<2	0	0.1	35.0	85.5	13.6	0.9	15.1	Sand
118/127-168	5Cg	D	10YR 5/8	2.5Y 5/4 and 5Y 5/3	0.4	0.6	0.8	8.1	2.2	0	0.1	53.6	67.4	26.9	5.7	4.7	Sandy loam

Table 3. (cont.). Physical and chemical properties of the nine soils studied.

Depth	Horizon	Sediment	Munsell Color		ECe	SAR	Mg/Ca	pH	CCE	Gypsum	OM	Rock fragments	Sand	Silt	Clay	Silt/Clay	USDA Textural class
cm			Matrix	Mottles	dS m ⁻¹				%								
GA56 Typic Calcixerept																	
0-35	A	L	2.5Y 5/3		0.8	0.6	1.1	8	23.9	2.2	1.5	0.9	64.7	25.3	10	2.5	Sandy loam
35-85	2Bk1	L	2.5Y 6/5	7.5 YR 4/6	11.8	4.9	5.4	8.1	38.4	<2	0.5	0.0	50.5	27.1	22.4	1.2	Sandy clay loam
85-100/105	2Bk2	L	10YR 6.5/4	7.5 YR 4/6	2.1	3	6.9	8.2	50.9	0	0.2	0.3	44.1	23	32.9	0.7	Clay loam
100/105-110/117	3C	SL	10YR 6.5/5	5Y 5.5/2 and 7.5YR 6/8	1.2	1.8	5.5	8.2	16.5	0	0.1	15.4	85	11.9	3.1	3.8	Loamy sand
110/117-135/145	4C	D	10YR 5/6	7.5 YR 6/8 and 7.5 YR 2.5/3	1.1	1.5	6.7	8.2	6.9	0	0.1	33.7	67.9	25.8	6.3	4.1	Sandy loam
135/145-170	4C2	D	7.5YR 3.5/4	7.5 YR 6/8	-	-	-	-	<2	2.6	0	62.7	73.8	20.9	5.3	3.9	Sandy loam
GA57 Sodic Calcixerept																	
0-22	A	L	2.5Y 6/2		0.9	1.3	0.8	8	27.7	2.9	1.8	1.5	71.1	21.7	7.2	3	Sandy loam
22-42	Cy	L	10YR 5.5/2		20.3	17.9	3.2	8.1	29.5	3.2	0.8	2.1	59.6	29.4	11	2.7	Sandy loam
42-80	2Bgk	D	10YR 5.5/8	10R 2/1 and 5Y 6/2	22.6	19.1	5.9	8.1	14.9	<2	0.3	61.3	62.1	27.6	10.3	2.7	Sandy loam
80-110/120	2C	D	5YR 4/6	5Y 6/2	19.1	18.3	7.9	7.9	8.1	<2	0.3	63.1	72.2	21.1	6.7	3.1	Sandy loam
110/120-135	3C	D	5YR 4/6	10YR 6/3	25.2	20	10.5	7.9	<2	<2	0.1	4.0	70.7	24.4	4.9	5	Sandy loam
135-205	4C	D	5YR 4/6		23.9	19.4	9.3	7.9	<2	<2	0.1	42.5	76.1	18.7	5.2	3.6	Loamy sand
GA58 Calcic Aquisolid																	
0-4	Az	L	10Y 5.5/1	5PR 2/1	70.7	33.4	5.6	8	23	9.3	1.6	14.2	56.3	32.7	11	3	Sandy loam
4-43/48	2Bkz	SL	7.5YR 4.5/6	5PR 2/1	37.6	25.5	7.7	8.2	23.2	2.5	0.5	41.7	62.3	22.1	15.6	1.4	Sandy loam
43/48-85/97	3Ckz	D	5YR 5/7	5PR 2/1	41.5	26.7	16.3	7.9	<2	2.5	0.2	57.8	63.6	29.4	7	4.2	Sandy loam

Table 3. (cont.). Physical and chemical properties of the nine soils studied.

Depth	Horizon	Sediment	Munsell Color		ECe	SAR	Mg/Ca	pH	CCE	Gypsum	OM	Rock fragments	Sand	Silt	Clay	Silt/Clay	USDA Textural class
cm			Matrix	Mottles	dS m ⁻¹				%								
85/97-105	4Cgz	D	10YR 5/8		38.7	25.4	24.1	7.6	<2	2.1	0.2	5.9	55.9	35	9.1	3.8	Sandy loam
105-127	5Cz	D	5YR 4.5/6		47.7	27	20	7.4	<2	<2	0.1	64.9	72.9	21.4	5.7	3.8	Sandy loam
127-180	6Cz	D	5YR 5/7		53.1	28.8	23.4	7.2	<2	<2	0.1	62.3	85.5	13.3	1.2	11.1	Loamy sand
GA59 Typic Calcixerept																	
0-20	A	L	10YR 5/2		5	3.7	1.3	7.6	41.5	3.7	3.6	0.0	37.7	40.8	21.5	1.9	Loam
20-55	Bwg	L	2.5Y 5/1		6.1	7.2	2.6	8	28.1	3.5	1.5	0.8	35.8	43.4	20.8	2.1	Loam
55-100/160	2Bgk	SL	10YR 5/8	10YR 2.5/1	14.1	10.7	2.9	8	27.5	3.7	0.3	46.0	32.3	43.1	24.6	1.8	Loam
100/160-190	3Cg	D	7.5YR 4.5/6	10YR 2.5/1	15.1	13.6	5.5	7.8	2.9	3	0.1	50.0	37.3	44.4	18.3	2.4	Loam
190-200	4Cg	-	5YR 4/6	10YR 2.5/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

The salinity of the soil samples, measured as E_{Ce}, shows a broad range, from 0.2 dS m⁻¹ to 70.7 dS m⁻¹. In general, the maximum salinity within the soil profiles is found mainly below 100 cm, evidencing the influence of the saline groundwater. Comparing the different soils using the E_{Ce} values estimated for the 25 cm synthetic layers (Figure 6), the 0–25 cm soil layer is usually less saline than the subsurface layers with the exception of the lowest terrace T0. Following the salinity phases established for irrigated agricultural soils by the NRCS (Soil Survey Division Staff, 1993) and modified by Nogués et al. (2006), and taking into account the greater E_{Ce} of the 0–50 cm soil samples, we obtain a saline soil distribution that depends on the terrace level and the distance to the depression depocenter (i.e., GA58). Very strongly saline soils occur at the innermost fringes of the lower terraces whereas non-saline soils are found at the outermost fringes of the upper terraces. Paralleling soil salinity, the maximum Mg/Ca ratio (>14) occurs in the very strongly saline soils of the lowest terraces (Table 3).

Even though the downwind palustrine area of Gallocanta Lake is quasi isolated from the main lake bed, soil salinity is still a major feature associated with the occurrence of saline groundwater and the evapoconcentration caused by capillary rise. However, the leaching of soluble salts down the soil profile by rainwater results in decreased salinity in the surface layers except for the lowest terrace T0, where the upward movement of saline groundwater predominates. The lateral surface and subsurface flows of fresh water that enter the palustrine area probably cause the local differences in soil salinity.

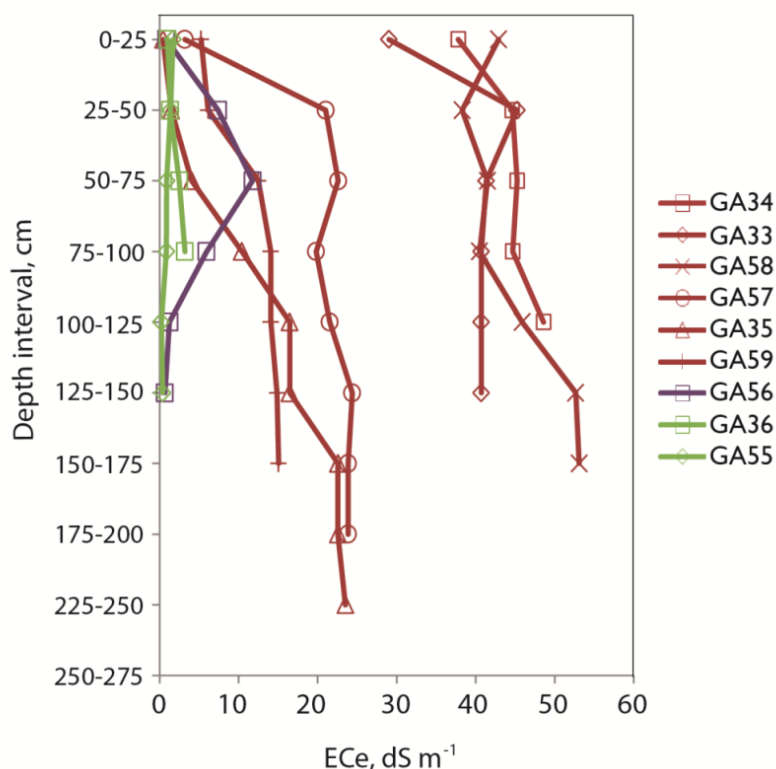


Figure 6. Soil salinity (ECe) of the studied profiles displayed for 25 cm-thick layers. Profiles are colored according to their mean salinity: very strongly saline and strongly saline soils are red; moderately saline soil is purple; and non-saline and slightly saline soils are green.

The soil samples have a predominantly sandy loam texture with a mean sand content of 59%, ranging from 27% to 86% (Table 3). These sandy soils contrast with the clayey materials of the main lake floor previously described by González-López et al. (1983) and Mayayo et al. (2003). Based on the particle size distribution estimated for the 25 cm synthetic layers, the surface horizons are sandier than the subsurface horizons (Figure 7). The upper terraces show increased sand content at a depth of about 75–100 cm. This sand increase consistently correlates with the sandy layer identified in the soils of the main lakebed margins at a similar depth (Castañeda et al., 2015). The exceptionally high silt/clay ratios (up to 43.6) at a soil depth of approximately 100 cm and at various terrace levels (Table 3) is probably related to the occurrence of that sandy layer. A rise in the lake water level could be inferred from this increase in grain size, something which is also seen at a shallower level in GA33, which has a similarly high silt/clay ratio (18.7) (Table 3). The Loma de Bello barrier presents three consecutive fining downwards sequences with their boundaries at depths of 100 cm and 250 cm (Figure 7). These cycles are marked by abrupt changes in the sand and clay content (Table 3), probably revealing a pattern of successive lake water level fluctuations.

Based on the mean sand content per profile, the lowest sand content corresponds to GA59, in the northern sector of the palustrine plain, whereas the highest sand content occurs at GA55, the easternmost point of the NW–SE transect (Figure 2). These extreme values probably reflect the effect of the prevailing NW wind which promotes the accumulation of sandy sediments towards the SE, i.e., GA55. Wind action is also inferred from the relatively high percentage of quartz gravels in the topsoil at GA58 (Table 3); this suggests the prevalence of aeolian deflation and subsequent downwind accumulation. In this regard, an aeolian supply of sand to this lee zone of the lake cannot be discounted, as has been recorded in other lacustrine lunette deposits (Lees, 1989).

Romeo-Gamarra et al. (2011) determined the mineralogical composition of the clays in soils of the north and south lake margins subjected to similar intermittent flooding conditions. Illite predominates, up to 73%, whereas dolomite ranges from 3 to 9%, and quartz varies from 8 to 15%. Smectite also occurs in strongly saline soils, with percentages up to 15%. Qualitative determinations of clay minerals by Calvo et al. (1978) and Aranzadi (1980) also mention the illite as predominating, with a lesser quantity of kaolinite, and even including small proportions of smectite.

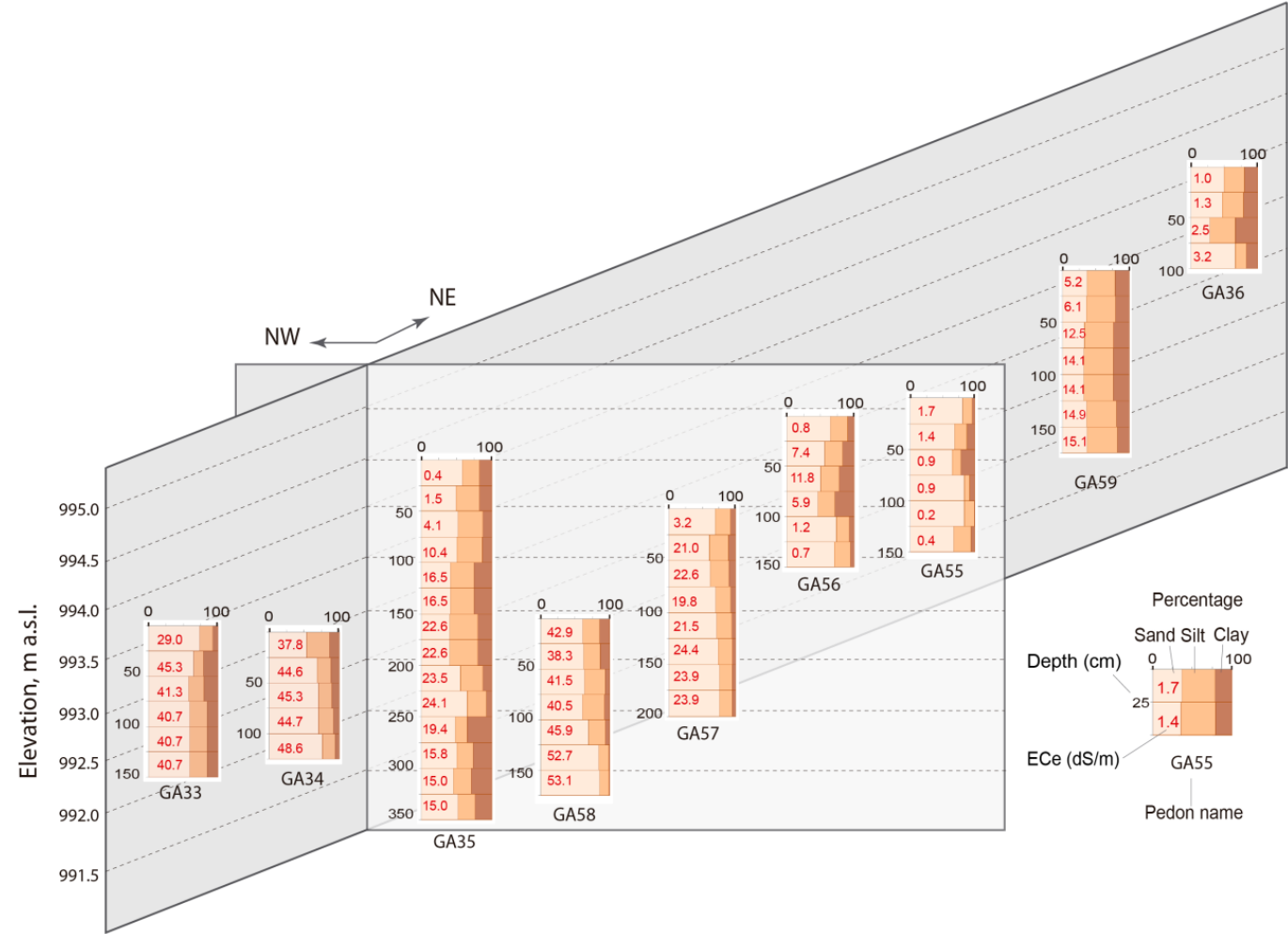


Figure 7. Soil profiles studied through the two perpendicular toposequences with the particle size distribution and ECe values (in red), calculated for the 25-cm thick synthetic soil layers.

4.5. Pedogenic accumulations and redoximorphic features

Carbonate accumulations are common at all terrace levels (with the exception of GA35) and include gravel coatings and pendants, as well as soft and friable nodules from 5 to 15 mm. These accumulations, together with redox mottles, are best developed at the bottom of the B and C horizons (Figure 8). The non-saline soils contain the highest content of carbonate nodules, >40%, and even a non-cemented carbonate crust (Figure 8). Carbonate coatings, pendants and banding are much less frequent in the strongly saline soils. The morphologies of the carbonate accumulations at all terrace levels correspond to stage II of pedogenic carbonate development (Machette, 1985; Schoeneberger et al., 2012), in contrast with the stage IV carbonate development found in the older soils of the alluvial fans surrounding the lake (Castañeda et al., 2015). The widespread occurrence of non-cemented carbonate nodules and bands evidences present day mobilization of carbonates, suggesting a close relationship with the fluctuating water table. Gypsum accumulations are very scarce (Figure 8). Gypsum crystals occur in surface (GA33) and subsurface (GA35) saline layers together with friable gypsum nodules. Vermiform gypsum can be seen in the upper horizons of GA57. Salt crystals are visible in subsurface horizons at the lowest terrace level (GA58).

Redoximorphic features resulting from prolonged soil saturation and related to alternating wetting and drying cycles, such as seasonally high groundwater or flooding, are widespread in the palustrine area. Small iron and/or manganese oxidation mottles are frequent, though sparse, in the subsurface horizons of all the pedons studied. The oxidation mottles are either dark (mean value = 2 and chroma = 1) or light (mean value and chroma = 6) (see Table 3 and Figure 8), and are sometimes associated with pores, rock fragments, and root channels. Occasional black, rounded or banded manganese oxide mottles (10YR 3/1) are seen in soils with contrasted salinity (GA34 and GA36). Gray reduction mottles are frequent or abundant in some of the studied soils; they are 2.5Y or 5Y in color with a value of ≥ 5 and chroma of ≤ 4 . This occurs in subsurface horizons at a soil depth which increases with the terrace level. Reduction mottles can form vertical tongues up to 20 cm in length, probably related to preferential circulation of water, revealing the intensity and extent of the reducing conditions in the palustrine area. Accumulations of manganese bands (5PB 2.5/1) are also present in subsurface horizons where a high concentration of reduction mottling occurs (Figure 8).

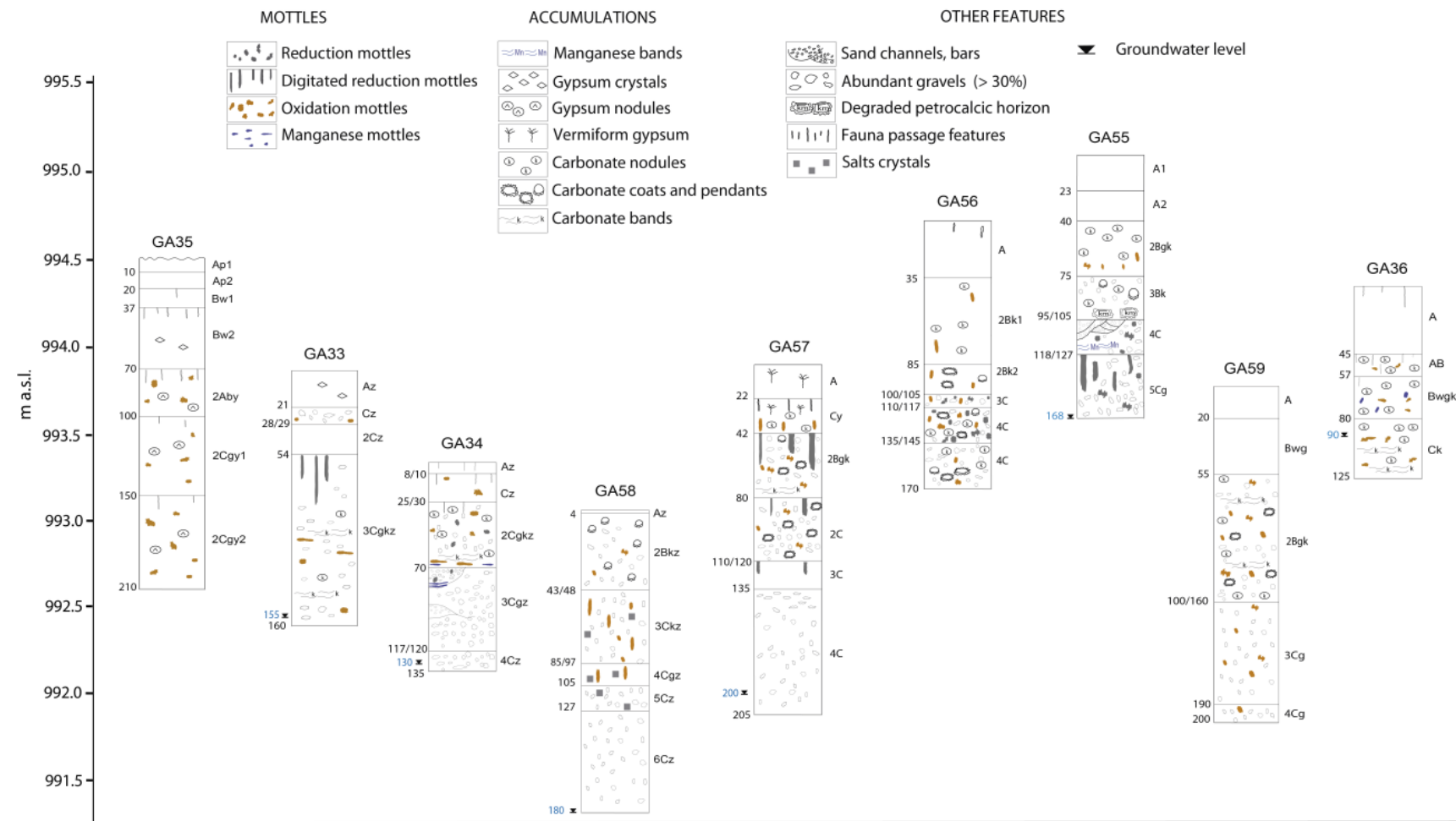


Figure 8. Main morphological features of the soils studied along the NE–SW and NW–SE toposequences.

Redoximorphic features in other soils of Gallocanta Lake have been described from macro to microscale in different landscape positions, under either oxidizing or reducing conditions (Castañeda et al., 2015). In general, soils of the palustrine area are under predominantly oxidizing conditions, probably favored by the high porosity of the sandy materials and the significant percentage of gravels in subsurface horizons that allow air and water to circulate. The only exceptions are the surface horizons of GA34 and GA59, from the lower T1 and T2 terraces. There, reducing conditions are preserved probably due to a higher flooding frequency because of their proximity to intermittently ponded areas (Figure 2). Another noticeable redox feature is the presence of depleted matrix in the surface layers of the GA34, GA35, and GA57 soils. According to the criteria of Richardson and Vepraskas (2001) and the USDA–NRCS (2010), these soils are hydric.

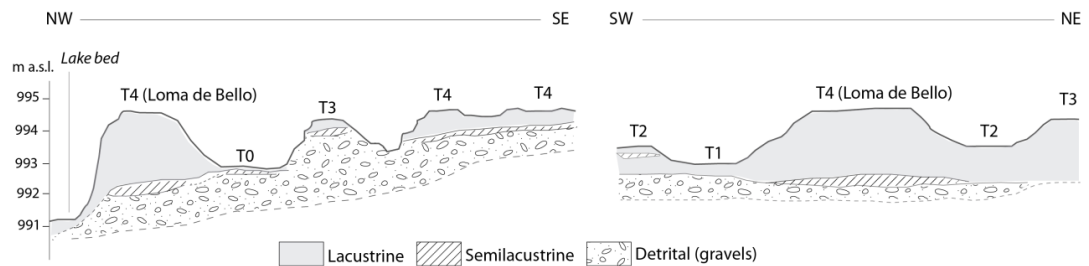


Figure 9. Scheme of the lacustrine, semi-lacustrine, and detrital materials along the two toposequences studied.

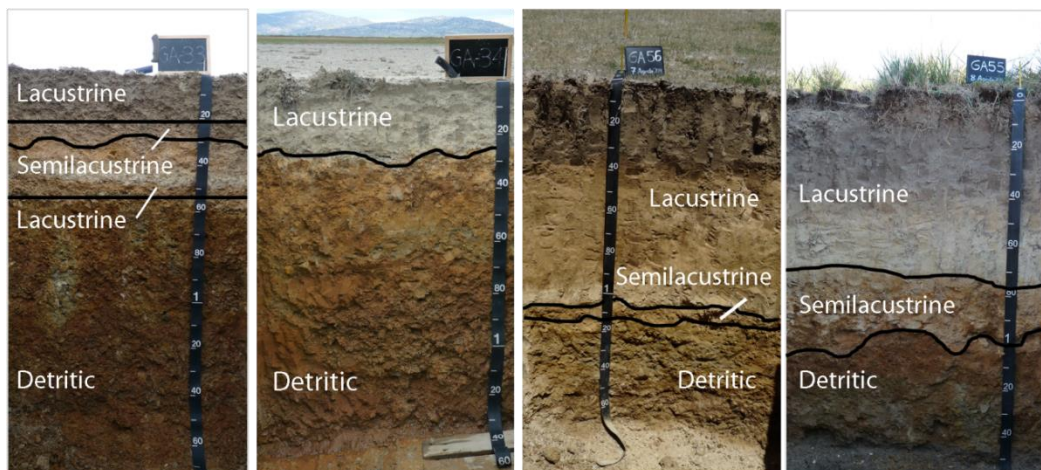


Figure 10. Sequence of lacustrine, semi-lacustrine and detrital materials in four selected profiles (GA33, GA34, GA56 and GA55).

4.6. Soil genesis under alternating conditions

The palustrine soils of the lowest terraces were submerged in the past century (Pérez-Bujarrabal, 2014), covered by macrophytes (Comín et al., 1983), and most likely subjected to subaqueous pedogenesis (Demas et al., 1996). These soils have been exposed during periods of low water level in the lake, which have been longer and/or more frequent in recent decades (CHE, 2003). The formation of these soils results from alternating episodes of flooding with fresh to hypersaline water, and subsequent drying, analogous to a tidal environment.

Soils of the palustrine downwind plain are regularly truncated and subjected to a constant process of rejuvenation, as shown by the buried horizon and the grain size sequences of GA35; the truncated sequence of GA57, which is common in subaqueous soils (Demas and Rabenhorst, 1999); and the frequent lithological discontinuities (Figure 8). The presence of hiatuses in the sediments of Gallocanta Lake has been previously identified from limnological data (Rodó et al., 2002).

Two main discontinuities affecting the palustrine plain are identified based on the presence of wavy boundaries. These discontinuities are associated with different episodes of lacustrine and detrital material sedimentation. A deep limit, at about 100–120 cm in the upper terraces, suggests a relationship with the predominant alluvial–littoral sediments underlying the lake bottom. This erosive episode is more evident in soil profiles at the outermost fringe of the palustrine area, GA55 and GA56 (Figure 8). A shallower discontinuity, at a depth of about 30–40 cm in the lowest terraces (Figure 8) suggests episodes of renewed flooding due to a rise in the lake water level and the input of detrital material from the main lake.

A simplified pedogenetic model of the palustrine area consists of a sequence of gray lacustrine layers overlaying reddish detrital layers. The lacustrine layers have a high CCE content (mean = 37%) and low gravel content (mean = 3%). Their thickness increases with terrace level. The detrital layers, which in places are capped with sandy channels and bars, have a low CCE content (mean = 6%) and consist of quartz gravels (51%) probably with an alluvial–littoral origin. Lacustrine fine–grained gray layers overlay the detrital and frequently erosive reddish layers (Figures 9 and 10). Locally, semi–lacustrine layers with a high content of both CCE and gravels occur at the base of the lacustrine horizons, usually with a wavy lower boundary, or are intercalated with lacustrine materials (e.g., at GA33, Figure 10).

4.7. Lacustrine terraces and historical records of water occurrence

Figure 11 shows the available records of water level in Gallocanta Lake together with the elevation of the five palustrine terraces. Only the lowest terraces are susceptible to flooding from the maximum water levels recorded over recent decades. The lake water level needed to cover the median elevation of the uppermost terrace is 4.5 m. This

elevation corresponds to a surface extent of about 2300 ha, comparable with the 1800 ha and 4 m depth estimated by pioneering studies in the 19th century (Pérez and Roc, 1999). In 1974 the surface extent of the lake water was estimated to be 1505 ha and, recently, it has decreased to 500 ha (CHE, 2003).

Evidence for the extent of the water surface during flooding events includes the limited records of water level measurements from the 1970s recorded by CHE (2003), occasional aerial photographs from the past century (Pérez-Bujarrabal, 2014), and remote sensing data (Díaz de Arcaya et al., 2005; Castañeda and Herrero, 2009b). The oldest reference evidencing water level fluctuation is the shoreline retreat of up to 200 m mentioned by Hernández-Pacheco and Aranegui (1926). The variation in water level recorded from 1977 to 1988 by Comín et al. (1983, 1990) is associated with annual and seasonal rainfall changes. Seasonal changes in lake water level are from 20 to 60 cm every year (Comín et al., 1990).

Figure 11 A and B summarizes the quantitative and qualitative information available on Gallocanta Lake water level fluctuations compiled from several authors (Aranzadi, 1980; Gracia, 1990; Comín et al., 1990; Rodó et al., 2002, CHE, 2003) from 1944 to the present (Luna et al., 2014). At the beginning of the eighties the lake totally desiccated, whereas the wettest period identified was 1970–1977, when the lake reached its maximum water level, 2.84 m, according to the scale monitored by Pérez-Bujarrabal (2014). A rough correlation is made between wet/dry years obtained by applying the standard definition of normal years (Soil Survey Staff, 2014) (A, Figure 11) and by compiling the observations from the literature regarding the presence of water in the lake (B, Figure 11). The number of years with rainfall above or below the normal year is fewer than the number of dry, very dry, or wet years compiled from the literature. The best correspondence between the two data sources are for the wet period 1957–1977, and the dry period 1982–1984, as well as the following wet years (1987–1991). In the last two dry decades, only five years have really been dry based on annual rainfall estimates.

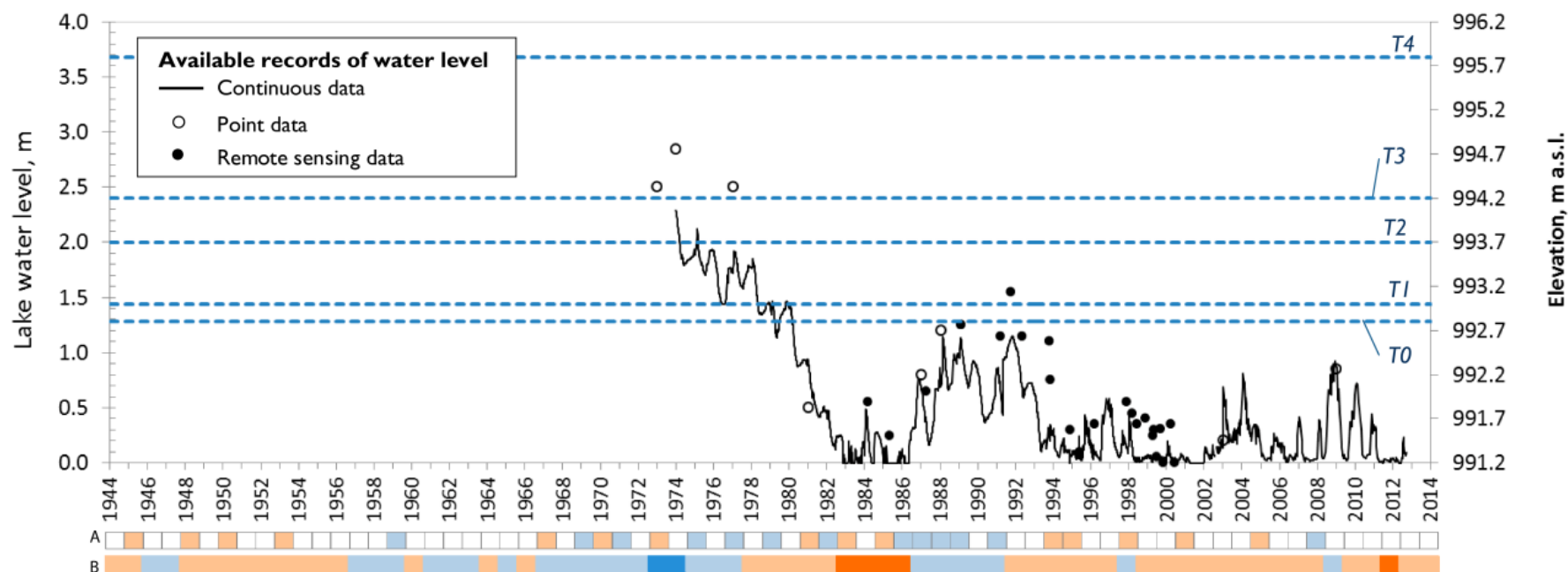


Figure 11. The available water level records of Gallocanta Lake, including continuous (line) and point (dots) measurements, and the mean elevation of the five lacustrine terraces in the downwind palustrine area of Gallocanta Lake. The colored horizontal lines along the bottom represent: A) annual rainfall from 1944 above (blue) and below (orange) the normal year (Soil Survey Staff, 2014); and B) dry (orange), very dry (dark orange), and wet periods (blue and dark blue) as described in the literature (see references in the text).

5. Conclusions

Photointerpretation based on aerial photographs taken in the summer of 2006 was crucial in identifying the subtle landforms of the downwind palustrine area. Integrating LiDAR high-resolution DEM with geomorphological photointerpretation provides consistency when delineating the recent lacustrine terrace levels. The pronounced flatness of Gallocanta Lake, together with intense and persistent unidirectional winds paralleling the marked elongation of the lake, have produced predominant water and sediment transport towards the lee zone where sedimentation processes have generated a set of lunettes forming a complex lacustrine barrier. A palustrine area was therefore generated beyond the barrier, but which was still connected to the main lake body through small inlets. As a consequence, the flat downwind palustrine area was protected against the erosional action of waves, but was particularly sensitive to lake water fluctuations. Several cycles of water fluctuations as part of a general trend towards desiccation gave way to the generation of 5 stepped lacustrine terrace levels that display different pedogenetic properties. At lake scale, the distribution, shape and topography of the successive lacustrine terraces in the palustrine zone evidence a sustained retraction of the lake area which seems to be a result of climatic drying, although brief re-flooding episodes have also been identified. At a finer scale, the pedogenesis of soil terraces reveals morphological and sedimentary changes including truncations and discontinuities in the soils. Pedogenesis has resulted in a sequence of fine-grained, gray lacustrine layers with a thickness that increases according to the terrace level, overlaying detrital and erosive carbonate-poor reddish layers. Our findings show that there was a scant development of lacustrine sedimentation following an intense period of predominantly detrital sedimentation, meaning an episode of high water level in the lake is required to explain the distribution and surface expression of these deposits. The downwind palustrine area of Gallocanta Lake provides a record of enormous edaphodiversity, constituted by a variety of complex lacustrine environments where pedogenesis has been strongly controlled by flooding episodes. The lacustrine materials found in the soils studied confirm that the downwind area was part of the submerged floor of a much larger paleolake, and in addition they indicate past palustrine conditions. The next step in the research will be the dating of the different terraces in order to evaluate the rate at which pedogenetic processes have acted in this fluctuating environment.



CAPÍTULO 6.

Reducing conditions in soil of Gallocanta Lake, northeast Spain

Reducing conditions in soil of Gallocanta Lake, northeast Spain

Resumen

Los humedales salinos han recibido poca atención para ser estudiados y esta falta de atención a menudo ha resultado en la degradación de estos espacios, en una limitada conservación y un insuficiente conocimiento para diseñar planes de conservación y gestión. La Laguna de Gallocanta es una reserva natural de importancia internacional para las aves, especialmente las de invierno, aunque los recursos del suelo, que son el soporte donde se desarrollan los endemismos y los hábitats protegidos, se han reconocido más recientemente. El suelo de la Laguna de Gallocanta experimenta fuertes oscilaciones de saturación y drenaje seguido de secado debido a las lluvias irregulares y a las condiciones de inundación asociadas a las fluctuaciones del nivel de agua de la laguna. En este estudio se han examinado las condiciones de reducción y los aspectos morfológicos de reducción del suelo en el entorno de la laguna mediante la instalación de tubos indicadores de reducción de los suelos (IRIS), recubiertos con óxidos de hierro.

Se han estudiado cinco zonas durante un periodo de entre 22 y 34 semanas. La cantidad promedio de hierro extraído de los tubos IRIS durante ese periodo oscila entre 0.5 y 95%. La intensidad de la reducción en el suelo difiere según las pequeñas diferencias topográficas entre los sitios, la intensidad aumenta con la disminución de la elevación. La gran salinidad del suelo (conductividad eléctrica del extracto de suelo, $E_{Ce} = 18.1$ a 182.0 dS m^{-1}), y la composición rica en carbonatos (de 18.4 a 69.7%) y sobretodo poco contenido de materia orgánica (de 0.4 a 6.2%) no parecen limitar la movilización de hierro debido a las condiciones de reducción. Las diferencias en la pérdida de hierro y en los patrones de manchas en los tubos IRIS muestran la heterogeneidad de las condiciones del suelo y la complejidad de los factores implicados en los procesos redox. Se necesita continuar la investigación para adquirir mayor conocimiento sobre los procesos redox en el contexto de la pedogénesis en ambientes lacustres semiáridos.

Este capítulo se ha publicado en la revista *European Journal of Soil Sciences*. IF (2016): 3.425 (3/34 Soil Sciences).

Castañeda, C., **Luna, E.**, Rabenhorst, M., 2017. Reducing conditions in soil of Gallocanta Lake, northeast Spain. *Eur J Soil Sci*, 68: 249-258. doi:10.1111/ejss.12407

Abstract

Saline wetlands have received limited attention from researchers and this neglect has often resulted in their degradation and limited conservation, and insufficient information to design conservation and management plans. Gallocanta Lake is a nature reserve of international importance for winter birds although soil resources, which support endemisms and protected habitats, have been recognized more recently. The soil of Gallocanta Lake undergoes strong oscillations of saturation and drainage followed by drying because of irregular rain and variable flooding conditions associated with fluctuations in the level of the lake. This study examined reducing conditions and morphological indicators of reduction in the soil around the lake with indicators of reduction in soils (IRIS) tubes, which are coated with iron oxides. We surveyed five sites for between 22 and 34 weeks. The average amount of iron removed from the IRIS tubes during the period studied ranged between 0.5 and 95%. The intensity of reduction in the soil differs according to subtle topographic differences between sites; it increases with the decrease in elevation. The large soil salinity (electrical conductivity saturated soil extract, E_{Ce}, from 18.1 to 182 dS m⁻¹), carbonate-rich composition (from 18.4 to 69.7% calcium carbonate equivalent, CCE) and overall small organic matter content (from 0.4 to 6.2% OM) do not seem to constrain iron mobilization because of the reducing conditions. Differences in iron depletion and patterns on the IRIS tubes show the heterogeneity of soil conditions and the complexity of factors involved in redox processes. Further research is needed to gain knowledge of the redox processes in the context of pedogenesis in semiarid lacustrine environments.

Key words: hydromorphic soil; indicator of reduction in soils (IRIS) tubes; lacustrine; semiarid; soil micromorphology; soil reduction; soil salinity.

1. Introduction

Most recent studies of water levels of the Gallocanta Lake have focused on the effects of climatic and hydrological changes (Comín et al., 1983; Rodó et al., 2002). Few studies have focused on morphological changes in saline soil of shallow lakes that

fluctuate in depth, and where pedogenesis is strongly related to the water level of the lake. The intermittent desiccation of Gallocanta lake, especially during the last few decades because of the decrease in rainfall (Luna et al., 2016), has favoured the succession of subaqueous and oxidizing conditions in the soil that leads to variable saturation. Redoximorphic features in Gallocanta Lake have been described recently in lakebed sediments and soil, and also in the peripheral agricultural soil (Castañeda et al., 2015).

Reducing conditions in soil related to anaerobic conditions have agronomic, ecologic and environmental significance, and their importance to wetland functions is widely recognized (Craft, 2001). The reducing conditions in soil are of interest for delineating wetland soil or to confirm the hydric conditions of soil for regulatory purposes (Rabenhorst, 2008). The occurrence of redoximorphic features is a key in many international soil classification systems to infer reducing conditions in soil (reviewed by Dorau and Mansfeldt, 2015). A field method for identifying reducing conditions in soil based on the indicator of reduction in soils (IRIS) tubes was developed by Jenkinson and Franzmeier (2006), adapted by Rabenhorst and Burch (2006) and evaluated in floodplain areas by Castenson and Rabenhorst (2006). This field method has been approved by the National Technical Committee for Hydric Soils (NTCHS) as a standard method and field indicator of reduced soil conditions in the USA (Rabenhorst, 2012) in wetland delineations. The IRIS tubes have been used to document reducing conditions in wetland soil (Rabenhorst, 2008; Dorau and Mansfeldt, 2015; Dorau et al., 2016) and, less frequently, in agricultural soil (Costantini et al., 2009).

Redox reactions affect pedogenetic processes and reflect hydrological functioning in the landscape. Even if landscape position is a consistent indicator of hydric soil in wetlands, wetland soil in semiarid regions is problematic and has been studied much less than the soil of humid regions. Semiarid wetlands undergo strong fluctuations in the water table because of the irregular rain and are frequently saline ($3\text{--}50\text{ g l}^{-1}$) or hypersaline ($> 50\text{ g l}^{-1}$) (Williams, 2002; Castañeda and Herrero, 2008). The dearth of inventories of saline wetlands, and maps of soil and vegetation, hampers the understanding of their ecological functions and hydric behavior. The limited amount of available information results in little regulatory recognition and in wetland degradation (Williams, 2002; Castañeda and Herrero, 2008). There has been little research on the processes of oxidation and reduction in the soil of saline wetlands although the factors that control the interactive effects of salinity and oxidation and reduction of iron under laboratory (Cameron et al., 1984; King and Garey, 1999) or field (Snyder et al., 2004) conditions have been published.

Relict redoximorphic features may be preserved in soil that was previously saturated and reduced. Moreover, the development of redox features is only indirectly related to how long soil has been saturated. Therefore, in the absence of site-specific

data on water table levels in Gallocanta Lake, we required a method that reflects the current reducing conditions in the soil. Our aims were to identify the reducing conditions of soil that are currently subjected to intermittent flooding in Gallocanta Lake, to relate the degree of reduction to soil characteristics and to test the applicability of IRIS tubes as a strategy for recognizing hydric soil in such semiarid conditions.

2. Study area

Gallocanta Lake, NE Spain, is the largest and best preserved saline lake in Western Europe. It has been included in the Ramsar list since 1994 and is protected under the European Union (EU) Birds and Habitats Directives. The lake is in a Quaternary depression at the bottom of a karst polje within the Iberian Range at 1000 m a.s.l. (Figure 1). The underlying Triassic lutites and interbedded evaporites contribute both to the high salinity of the lake, which is characterized by alternating wet and dry periods, and also to the subsequent variation in soil salinity (Castañeda *et al.*, 2015) and water chemistry (Comín *et al.*, 1983).

The climate is dry semiarid with very irregular rainfall. The mean annual precipitation for the last 70 years is 488 mm yr⁻¹; it ranges from 761 mm (in 1959) to 232 mm (in 2001). Mean temperature is 11.4 °C for the period 1969–2015, with 111 frost days per year. The mean annual water deficit is 605 mm (García-Vera and Martínez-Cob, 2004) which is exacerbated by the frequent winds. The soil temperature regime is mesic, and the soil moisture regime is generally aquic at the lake shore and xeric in agricultural areas (SSS, 2014).

Fluctuation in water level has received much attention, mainly because it can be used to identify Quaternary climatic and environmental changes (Schütt, 1998). The highest water level was registered in 1974 at 2.84-m depth, whereas during periods of low rainfall, which have been common in the last few decades, all of the free water of the lake has evaporated (records have been compiled by Luna *et al.* (2016)).

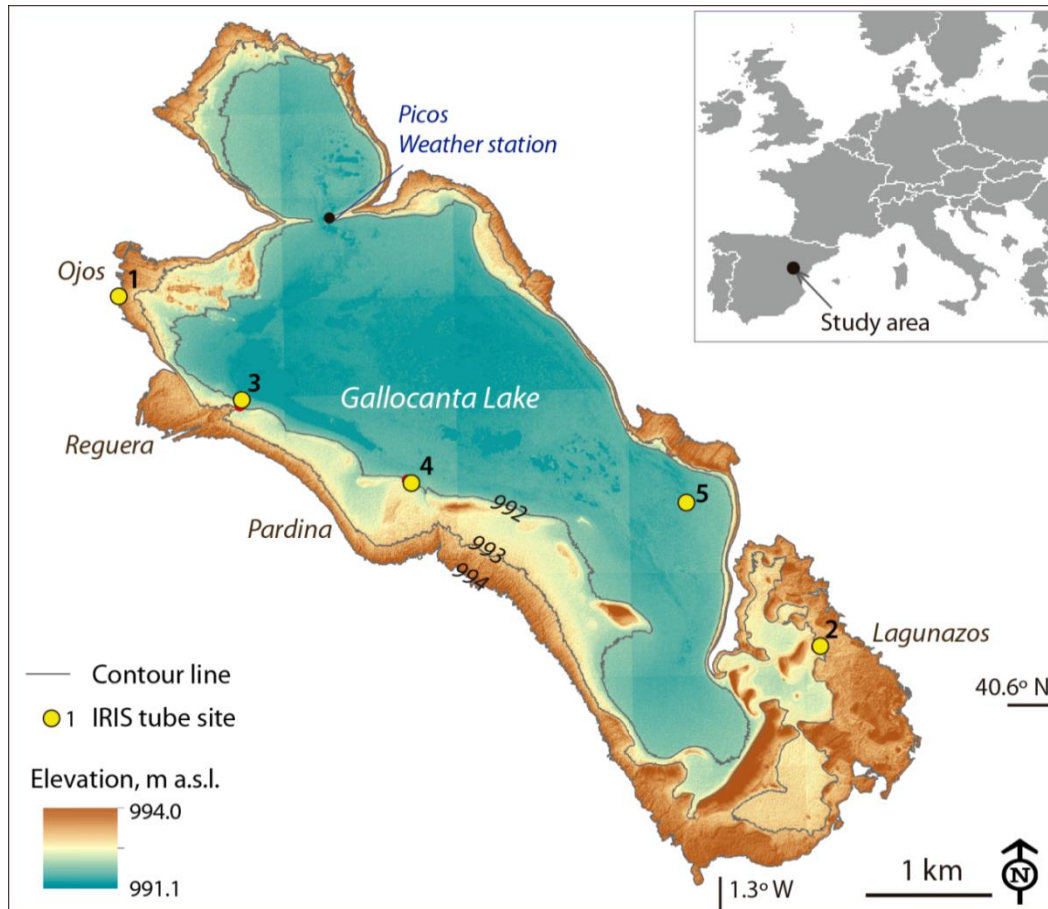


Figure 1. Colour-shaded LiDAR-derived digital elevation model of Gallocanta Lake with major contour lines and locations of the IRIS tubes.

3. Methodology

3.1. Selection of sites

We designed a purposive sampling scheme to detect redox conditions around the lake. We selected sites that flood intermittently based on a review of historical aerial photographs and Landsat images, geomorphic and pedological evidence (Castañeda et al., 2015), and our field work that extended from 2009 to the present. Our selection criteria required that the sites be undisturbed and accessible. At the time of the survey most sites were dry. Historic photographs and satellite images provide a glimpse of the conditions of the sites through time. The study sites were in different geomorphic units which include lacustrine terraces, lake bed and silt–sand barriers (Figure 1 and Table 1).

3.2. Installation and retrieval of the IRIS tubes

The IRIS tubes used to document the development of reducing conditions in soil are coated with an iron oxide suspension and the coating is dried afterwards (Castenson and Rabenhorst, 2006; Jenkinson and Franzmeier, 2006). Under water saturated, anaerobic and chemically reduced conditions, this coating is reduced by heterotrophic microbes and then solubilized and stripped from the tubes.

Five or three IRIS tubes have been used as replicates (Rabenhorst, 2008; Dorau et al. 2016, respectively) to account for soil heterogeneity. Sets of five IRIS tubes 60-cm long with the lower 50 cm coated were installed at each site (Figure 1) between April and July 2014. Five tubes were arranged in a cluster pattern within a one square metre area following the procedure of Rabenhorst (2008). The tubes were inserted into auger holes made in the soil with a 22-mm push probe. Instead of the four-week period used for basic monitoring with IRIS tubes (Rabenhorst, 2008), we left the tubes in place for between 22 and 34 weeks (Table 1). The removal of iron oxide was monitored every four weeks. This was done by examining the central tube (carefully removed and gently reinserted to avoid abrasion) of all sets for visual evidence of removal of the iron oxide coating. We retrieved the tubes in January 2015, except for the set at site 5, which was retrieved in March when the surface water evaporated and the site was easily reached. Each tube was washed gently in the field with tap water to remove any soil that adhered, and then the tube was photographed three times with the tube rotated 120° between each. Photography was done in the field to record the black mottles of ferrous sulphide (FeS) coating (Rabenhorst et al., 2010; Dorau et al., 2016) which is a metastable mineral under aerated conditions.

Table 1. Selected characteristics of sampled sites and groundwater.

Site	Reference name	Elevation	Geomorphic unit	Soil classification		Landcover	Total number of weeks	Ground-water depth cm	pH	EC ^c	NO ₃ ^{-d}	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺
		m a.s.l.		ST ^a	WRB ^b					dS m ⁻¹			mg l ⁻¹		
1	GA54	994.0	NW lacustrine terrace	ND		Saline grasses	22	-10	8.1	2.21	0.436	442	366	0.358	158
2	GA48	992.8	SE lacustrine terrace	Typic Calcixerept	Haplic Calcisol	Rush salt marshes	34	-23	6.9	17.5	19.4	5487	854	1.97	1295
3	GA53	992.4	Submerged silt-sand deposit	ND		Reed formations	22	-27	8.2	1.97	0.286	216	610	0.440	99.4
4	GA30	992.1	Sandy barrier	Typic Aquisalid	Gleyic Solonchak	Bare soil	30	-28	7.1	58.5	26.5	10 594	549	7.85	4893
5	GA28	991.8	Lake bed	Gypsic Aquisalid	Gypsic Gleyic Solonchak	Bare soil	30	-100	6.7	104.0	n.d.	29 408	488	20.6	11751

^aUSDA Soil Taxonomy (SSS, 2014). ND= not determined.

^bWorld Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2015).

^cElectrical conductivity.

^dn.d. = not detected.

The tubes were also photographed systematically in the laboratory under vertical view with a fixed field of vision. The three photographs of each tube were cropped and combined into a single digital image of the whole surface of the tube, and their cylindrical shape was projected into an equivalent plane. Black mottles on the IRIS tubes were quantified from the field photographs. The removal of iron oxide coating (Rabenhorst and Burch, 2006) was quantified for each binary image that was converted digitally. For each IRIS tube, the area of maximum removal of the iron oxide coating was calculated within the upper 30 cm of the tube, for a zone of 15 cm (Rabenhorst, 2008).

3.3. Laboratory analysis

The soil was sampled by auger (7 cm in diameter), except at sites 4 and 5 whose profiles were sampled and described in pits following Schoeneberger et al. (2012). Soil samples were air-dried at room temperature before placing in an oven at $\leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, and sieved through a 2-mm mesh. Soil salinity was measured as the electrical conductivity of the 1:5 soil:water extract (EC1:5) and the saturated soil paste extract (ECe). Electrical conductivities were expressed in dS m^{-1} at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Calcium carbonate equivalent (CCE) was determined by the Bernard calcimeter method based on the reaction with HCl, gypsum content was quantified by thermogravimetric analysis (Artieda et al., 2006) and organic matter (OM) was quantified by chromic-acid digestion (Heanes, 1984) and a UV/V UNICAM 8625 (Unicam Instruments Ltd., Cambridge, UK) spectrophotometer. Particle-size distribution was assessed by laser diffraction (Malvern MASTERSIZER 2000, Malvern, UK). The pH and EC of groundwater samples were measured with a pH electrode and a conductivity cell (Orion 9157BNMD and Orion 013605MD, respectively, Thermo Fisher Scientific Inc., Beverly, MA, USA) and major ions were determined by ion chromatography (Metrohm 861 Advanced compact IC, Metrohm AG, Herisau, Switzerland).

Surface soil samples (0–10 cm) at sites 4 and 5 that appeared black and smelled of sulphur were incubated in the laboratory under aerobic conditions for 18 weeks, and pH was measured weekly following the method of Creeper et al. (2012) and Grealish et al. (2010). Undisturbed blocks of soil from selected horizons were impregnated with a cold-setting polyester resin, and thin sections (135 mm \times 58 mm and 58 mm \times 42 mm) were prepared by the method of Guilloiré (1985) and described with a microscope under polarizing conditions following Stoops (2003).

4. Results

4.1. Rainfall data during the survey

Based on annual rainfall and following the criteria of the Soil Survey Staff (SSS, 2014), the year 2014 and years immediately preceding it would be considered to be 'normal' precipitation years. The rainfall registered in 2014 at the lake border by the Picos weather station (Figure 1) was 377 mm, 23% less than the long-term mean of 488 mm. The meteorological conditions during the study were characterized by a dry spring, with only 53.7 mm of rain from March to May. The autumn was more humid than spring, with 110 mm of rain from September to November. Observations of the depth of the water table indicated that it dropped during spring and summer of 2014, and it did not return to within 50 cm of the soil surface. The low spring rainfall together with the dryness (low level) of the lake caused a delay in the extraction of the tubes until after the autumn.

4.2. Main soil features

The soil is strongly saline (Table 2), with an E_{Ce} up to four times the salinity of ocean water (182 dS m⁻¹), and it has a large CCE content that ranges from 18 to 70%. Soil pH is mostly in the range between 7.6 and 8.6 and is probably dominated by the large CCE content. There is little organic matter in the soil of the lake fringes, < 2%, whereas it reaches 6.2 and 5.8% at the lake bottom (site 5) and where there are saline grasses (site 1), respectively. The particle-size distribution indicates that soil texture is essentially clay loam and sand content decreases with depth. Occasionally, gravels accumulate in the surface and subsurface horizons in areas where fluvial water enters the lacustrine system (site 3).

Table 2. Main characteristics of the upper 50 cm of soil at the IRIS tubes sites.

^aElectrical conductivity of the soil:water 1:5 extract. ^bElectrical conductivity of the saturation extract; ECe for sites 1 to 4 was estimated by regression between EC1:5 and ECe of samples from GA28 and GA30 (Castañeda et al., 2015). ^cCalcium carbonate equivalent. ^dOrganic matter.

Depth cm	Horizon	Munsell colour (Moist)		pH 1:2.5	pH paste	EC1:5 ^a — dS m ⁻¹ —	ECe ^b	CCE ^c	Gypsum	OM ^d	Gravels	Sand	Silt	Clay	USDA textural class
		Matrix	Mottles								%				
<i>Site 1 (GA54), auger hole</i>															
0–25				7.6		1.2	21.3	49.9	3.7	5.8	0.6	37.8	42.2	20.0	Loam
25–50				7.9		0.6	19.1	49.9	2.9	3.8	0.9	26.0	44.5	29.4	Clay loam
<i>Site 2 (GA48), auger hole</i>															
0–25				8.3		0.3	18.1	28.9	3.6	1.1	1.9	34.5	38.3	27.2	Clay loam
25–50				8.1		0.8	19.9	31.7	< 2.0	0.4	2.6	35.4	41.6	23.0	Loam
<i>Site 3 (GA53), auger hole</i>															
0–25				7.9		0.7	19.3	45.4	< 2.0	0.4	30.6	53.3	15.0	31.6	Sandy clay loam
25–50				8.0		0.6	19.1	45.1	< 2.0	0.4	23.5	34.7	29.8	35.5	Clay loam
<i>Site 4 (Pedon GA30)</i>															
0–10	Ag	2.5Y 6/2	7.5YR 6/6		8.3	9.4	67.7	37.6	4.4	0.8	0.8	61.2	18.5	20.4	Sandy clay loam
10–25	2Cg1	2.5Y 6.5/1.5	10YR 6/6		8.1	8.3	39.3	58.7	3.8	0.5		14.1	49.0	36.9	Silty clay loam
25–50	2Cg2	2.5Y 7/1.5			8.1	4.0	25.7	69.7	2.2	0.5		23.6	33.3	43.1	Clay
<i>Site 5 (Pedon GA28)</i>															
0–6/10	Ayzg	10B 2.5/1			7.9	65.8	182	18.4	27.1	5.8		79.8	15.5	4.7	Loamy sand
6/10–14/16	Cyg1	10B 2.5/1–5Y 6/1	5Y 6/1		8.5	36.2	146	29.3	14.5	6.2		62.4	25.1	12.4	Sandy loam
14/16–24	Cyg2	10B 5.5/1	10B 5.5/2		8.6	23.7	104	36.6	17.0	3.9		44.0	31.6	24.4	Loam
24–42	2Cyg3	2.5GY 6/1	10B 4.5/1		8.2	23.2	100	28.0	28.6	3.4		44.8	26.4	28.8	Clay loam
42–50	2Cyg4	7.5GY 6/1			7.9	22.6	97.5	52.0	5.7	1.2	0.8	15.0	40.2	44.7	Silty clay

The available descriptions of soil morphology in the area (Castañeda et al., 2015; Luna et al., 2016) indicate waterlogging or restricted drainage, with Gypsic Aquisalids at the lake bottom (Figure 2), Typic Aquisalids at the shoreline and Typic Calcixerepts in slightly elevated areas (Table 1). The soil at the lowest topographic positions (sites 4 and 5) is a hydric soil that conforms to the field indicator requirements established by USDA–NRCS (2010). At site 4, two horizons (Ag and 2Cg1) have a field indicator F3, ‘depleted matrix’ (USDA–NRCS, 2010), with a grey matrix colour (2.5Y and chroma ≤ 2), and common redox mottles (7.5YR and 10YR, Table 2). At site 5, the profile has a gleyed and an iron-depleted matrix with bluish, low chroma matrix colours (10B and 2.5GY and chroma < 2 , Table 2) that are consistent with the field indicator F2, ‘gleyed matrix’ (USDA–NRCS, 2010). Redox depletions (5Y and 10B) are abundant and are mainly associated with the occurrence of gypsum layers.

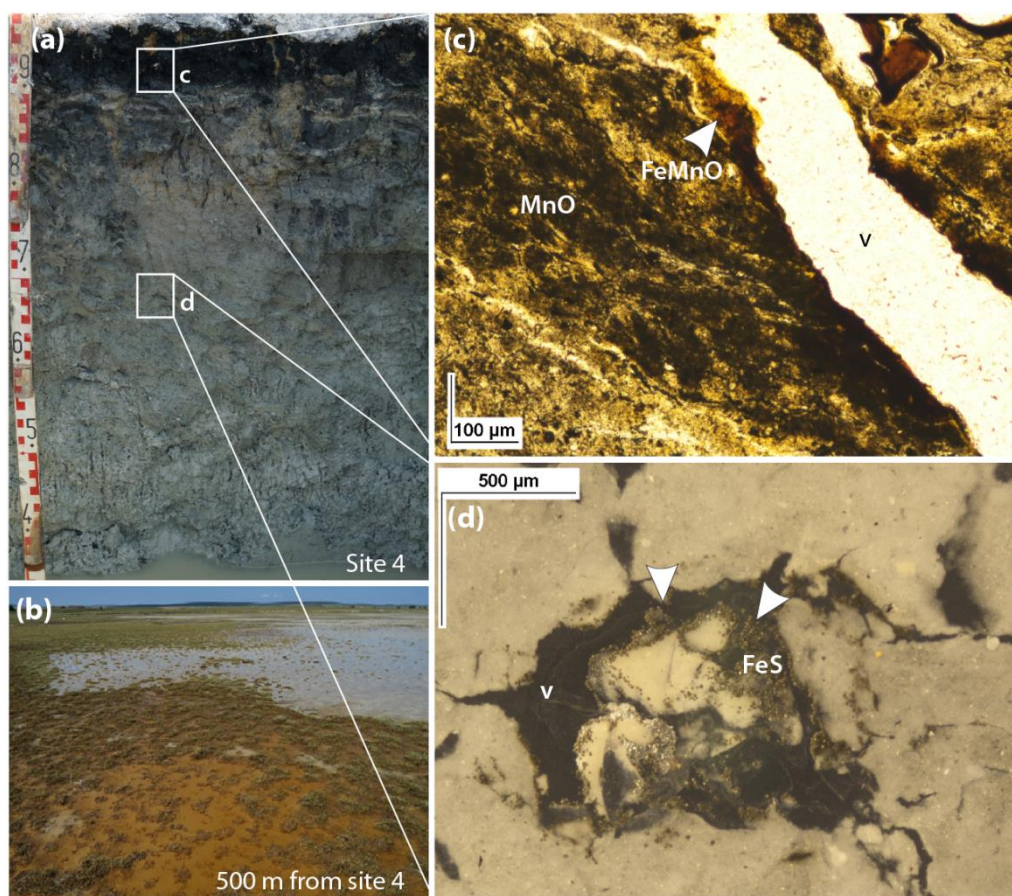


Figure 2. Evidence of iron and manganese mobilization in Gallocanta Lake: (a) in recently exposed soil at site 4, (b) at the soil surface in nearby areas subjected to intermittent flooding. Thin sections show redox micromorphic pedofeatures associated with voids (v), (c) manganese oxide (MnO) and iron–manganese oxide (FeMnO) impregnated hypocoatings observed with plane polarized light, Ayzg and (d) framboidal iron sulphide (FeS) coating observed with oblique incident light, 2Cyg3.

Micromorphic pedofeatures related to redox processes in soil on the lake floor include impregnated redoximorphic features such as banded iron and manganese oxide hypocoatings. Coatings adjacent to voids occur in the soil of the surface horizon (Ayzg horizon) where the abundance of biological remains favours the formation of a channel to lenticular soil microstructure (Figure 2c). Accumulation of iron sulphides as framboids, frequently clustered (Figure 2d), are common in subsurface horizons (Cyg3 horizon) with a massive to vughy microstructure and micritic cristalitic b-fabric as defined by Stoops (2003).

4.3. Groundwater characteristics

On the dates that the IRIS tubes were installed, observed water table depth ranged from –10 cm (site 1) to –100 cm (site 5) (Table 1). Free surface water occurred intermittently at all sites during the study period. Groundwater is non-saline in the marsh (saline grasses) and reed bed areas, sites 1 and 3. The current lake bed (sites 4 and 5) and the SE terrace (site 2) show similar groundwater characteristics, with a pH of between 6.7 and 7.1 and high salinity (although with a two-fold difference in EC among the unvegetated lakebed sites) with increased Mg^{2+} and SO_4^{2-} concentrations (Table 1). Nitrates are more abundant in saline groundwater, in particular at sites 2 and 4. The bicarbonate content is somewhat variable, with a two- to three-fold range between the maximum (854 mg l^{-1}) at site 2 and the minimum (366 mg l^{-1}) at site 1.

4.4. Iron oxide removal from the IRIS tubes

The percentage area with depleted iron in a 15-cm zone within the upper 30 cm of the tube for all five sites varies from 0.5 to 95.1%. It is also very variable between the five tubes at a single site (Figure 3 and Table 3). The greatest variation in iron oxide removal occurred at site 4 (standard deviation, SD, 39.7%) at the southern margin of the lake (Figure 1 and Table 3). Variability at the other sites was more modest (SDs from 2.9% to 11.5%). The zones of the tubes where the iron oxide coating was chemically reduced and removed were almost lacking iron oxide in some cases, whereas in others these zones retained a thin coating of iron oxide that contrasted distinctly with the original reddish brown colour (Figure 3). Occasionally, zones depleted of iron occurred above the zero level line, i.e. the mark on the tube that corresponded to 0 cm or ground-level.

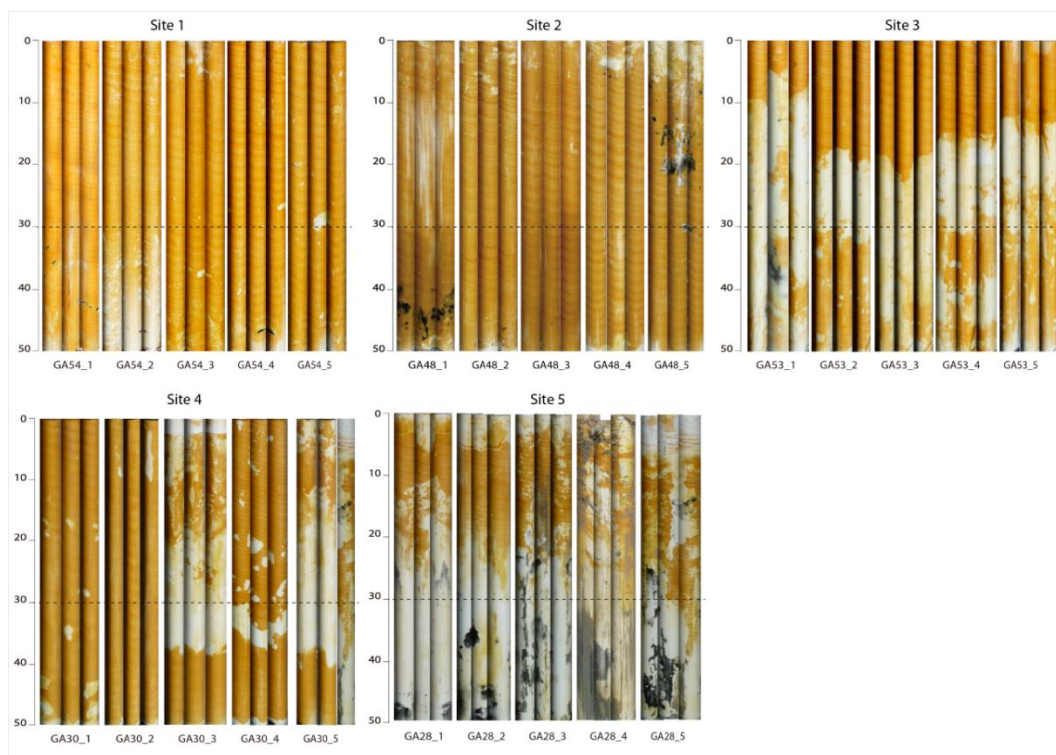


Figure 3. Photographs taken in the field of five replicate IRIS tubes from each site when they were extracted at the completion of the study.

The patterns of iron oxide removal included: (i) spots, corresponding to reducing conditions at microsites, (ii) area of continuous removal, corresponding to the reducing conditions in a whole horizon, 3) toroidal-shaped depletion patterns (Jenkinson and Franzmeier, 2006) similar to that formed by bacterial cultures and (iv) linear depletion patterns (Figure 3) often observed in areas with increased organic matter and microbial activity (Vepraskas and Faulkner, 2001) related to the occurrence of roots as a source of organic matter (Jenkinson and Franzmeier, 2006) or because of the activity of phytosiderophores (Dorau et al., 2016).

The soil at sites 3 and 5 (Figure 4) can be classed as a hydric soil based on the degree of reduction, Technical Standard (NTCHS). A minimum of three out of five IRIS tubes have > 30% of their coating removed in a zone 15-cm long starting within 15 cm of the soil surface (Table 3). The rate of reduction, determined as the percentage of iron oxide depleted per month on the surface of the tube, ranges from 0.4 at site 1 (Ojos, Figure 1) to 12% at the neighbouring site 3 (Reguera).

Table 3. Percentage of iron oxide depleted from a 15-cm zone of the IRIS tubes within the upper 30 cm of the soil surface (the main zone of interest when considering hydric soil issues) and percentage of black FeS mottles deposited on the tube.

^aFeS mottles that occurred along the full 50-cm length of the IRIS tubes at the time they were extracted from the field; T, tube; SD, standard deviation.

Iron oxide removal on a 15-cm zone	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5
<i>Number of IRIS tubes</i>					
Total	5	5	5	5	4
With $\geq 30\%$ iron oxide coating removal	0	1	5	2	4
<i>Surface removal / %</i>					
Mean	3.0	12.3	80.8	33.9	70.4
Median	1.5	8.2	75.8	8.9	69.6
Standard deviation	2.9	11.5	8.8	39.7	9.1
Maximum	7.1	30.4	95.1	86.8	80.9
Minimum	0.5	1.0	74.1	2.1	61.5
Range	6.6	29.4	21.0	84.7	19.4
Monthly rate	0.4	1.3	12.0	3.9	6.9
<i>Percentage of black FeS mottles^a</i>					
T1	0.4	2.6	1.8	0.1	5.4
T2	0.4	0.2	0	0	0.4
T3	0	0.1	0	0	12.2
T4	0.2	0.2	0.2	0.2	2.3
T5	0.2	3.6	0.1	0.1	4.6
Mean(SD)	0.2(0.1)	1.4(1.7)	0.4(0.8)	0.1(0.1)	5.0(4.5)

Iron monosulphides can form as black mottles on IRIS tubes by the rapid chemical reaction of soluble sulphide with the iron oxide coatings (Rabenhorst et al., 2010). The black FeS mottles were especially intense at sites 2 and 5, with a mean of 1.4 and 5%, respectively (Table 3). Speciation of aqueous sulphide is pH dependent, and the alkaline pH of the calcareous soil (Table 2) suggests that the pore water sulphide is primarily present as hydrogen sulphide (HS^-) (Garrels and Christ, 1965). The maximum percentage of black mottles per tube occurs at site 5, with a 12.2% cover of the whole tube (Table 3) and 19.2% of the upper 30 cm of the tube. It is likely that these represent minimum sulphide values for the tubes from site 5 because the black sulphide initially forms as a coating over the iron oxide coating (which adheres strongly to the tubing). However, if all of the iron oxide on the tube becomes converted to the black FeS (from large sulphide concentrations or over long periods of time), the FeS (without an undercoating of iron oxide) does not adhere to the tube and leaves the white tube exposed. Some parts of the

white areas at the bottom of the tubes from site 5 appear like this (mostly dark grey and white with little or no iron oxide), Figure 3.

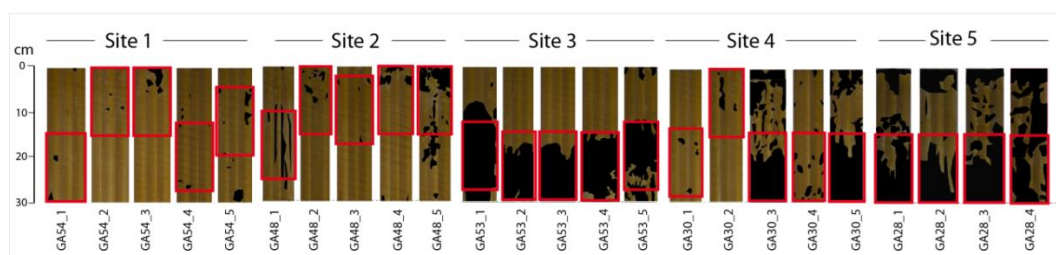


Figure 4 Photographs of IRIS tubes taken in the laboratory that show the upper 30 cm of the tubes. Black areas correspond to the iron oxide coating removed and red boxes indicate the 15-cm section of the 30-cm tube with maximum removal of iron oxide coating.

5. Discussion

The wet saline soil of the Gallocanta saline lake, which is subjected to intermittent flooding, shows evidence of the mobilization of iron and manganese oxides in exposed soil (Figure 2a) or even temporarily at the soil surface (Figure 2b). In spite of the subtle topography of the area (from 0.3 to 2.2 m of height difference among sites), elevation appears to condition the degree of reduction expressed in the iron oxide removed from the IRIS tubes. The average percentage of iron oxide removed from the 15-cm zone generally increases from 3 to 81% as the elevation decreases, even if the depth of groundwater when the tubes were installed increases (Table 1). Site 3 is an exception, with 0.6 m of relative elevation increase and an average iron oxide removal of 81 to 95%, probably because of surface water inflow from the intermittent Reguera stream into the lake, which causes longer periods of soil saturation in the zone of the stream's mouth. The neighbouring sites 1 and 3 represent the minimum and maximum intensity of iron depletion, respectively. Both sites have saline soil and fresh groundwater (Table 1), and their soil OM contents do not seem to affect the removal of iron from the IRIS tubes. A large percentage removal of iron oxide coating also occurs in the soil of site 5, which has large OM (up to 6.2%) and gypsum (mean of 21%) contents, and where NO_3^- is completely removed from groundwater (Table 1) by reduction to N_2 .

The vertical distribution of iron depleted zones along the tubes are not uniform (Figure 3) and shows a great variety of patterns, similar to that described by Jenkinson and Franzmeier (2006) in very different types of soils from a diversity of locations. Even in a single depleted area of the tubes Dorau et al. (2016) recognize gradients of reducing soil conditions.

The redox micromorphic pedofeatures show a redox gradient with soil depth, which accords with the overall pattern of iron oxide removal shown by field photographs of the IRIS tubes. The iron and manganese oxides in the surface horizon (Figure 2c) indicate alternating reducing–oxidizing conditions, which are favoured by the abundant coarse material and the more aerated soil microstructure. In contrast, iron sulphides accumulate only at depth (Figure 2d), which indicate that reducing conditions predominate because of the finer microstructure that controls soil porosity. Iron hypocoatings can be produced after several days of water saturation, whereas the formation of iron sulphide (pyrite) indicates very wet and reducing conditions from several months of water saturation (Lindbo et al., 2010).

Contemporary or relict micromorphological features may occur in the same horizon (Lindbo et al., 2010), but because the tubes had been installed for several months we recorded features that are actively forming. Based on the redox sequence (Ponnamperuma, 1972) and their corresponding E_H values summarized by Dorau and Mansfeldt (2015), all the sites studied have at least moderate reducing soil conditions because they show iron oxide removal which indicates E_H ranges from 100 to –100 mV. Sulphate reduction and FeS deposition of > 0.2% at sites 2, 3 and 5 indicate that these sites have strongly reducing soil conditions with E_H values < –100 mV. This is especially so at site 5, which is at the lowest landscape position and is where iron sulphide deposits were maximum. According to the qualitative field test categories proposed by Bartlett and James (1995), the soil at sites 2, 3 and 5 has a sulphidic redox status, i.e. controlled by transformations of sulphur.

In contrast with other carbonate-rich environments (Stiles et al., 2010) and laboratory observations (Couto et al., 1985), at Gallocanta Lake the expression of redox features is not inhibited by the buffering capacity associated with the large calcium carbonate equivalent content, CCE (47% as mean). In addition, observations in other soils (Craft, 2001) suggest that the availability of NO_3^- in groundwater does not appear to hamper the reduction and mobilization of iron. It is likely, however, carbonates and nitrates in the soil would reduce the rate of development and expression of redox features.

We observed little reduction of the iron oxide coatings on the IRIS tubes after four weeks at the lake floor site (site 5). In general, the average time required for tubes to show evidence of soil reducing conditions among all sites surrounding Gallocanta Lake was 27 weeks (Table 1). This was much longer than the time (days to weeks) required in non-carbonate environments (Jenkinson and Franzmaier, 2006; Dorau et al., 2016) or in controlled experiments (Rabenhorst et al., 2008; Dorau and Mansfeldt, 2015). We observed the effect of carbonate content during soil incubation, when, despite the presence of oxidizable sulphide, the decrease in pH (down to 7.3 during the first two weeks before rising to slightly alkaline values, 7.8) was inhibited in our soil samples which had 18.4% (Site 5, Ayzg) and 37.6% (Site, 4, Ag) CCE (Table 2), similar to reports by

Couto et al. (1985) under controlled conditions. The seasonal inundation observed at Gallocanta Lake suggests that intermittent saturation of the soil with water is probably the main reason for the small rate of reduction in our soil. Furthermore, the hysteresis effect observed in reduction at our sites might also be affected by the large carbonate content. Dorau and Mansfeldt (2015) suggested that the use of Mn-oxide coated tubes might improve the IRIS method by the preferential reductive dissolution of manganese over iron oxides. This would reduce the time required for monitoring and would enhance the differences in intensity of reduction between sites.

There is no clear relation between soil or groundwater composition (and salinity) and the degree of iron removal from the IRIS tubes, despite an eight-fold range in ECE (Table 2) and a 50-fold difference in groundwater salinity (Table 1). The oxidation of iron by bacteria is completely inhibited with 3 g NaCl in 100 ml water ($\cong 40 \text{ dS m}^{-1}$) under laboratory conditions (Cameron et al., 1984), whereas in the soil we studied it occurred at a much greater salinity (Table 1) indicating the complexity of natural conditions. This issue requires a fully experimental approach to gain further insight, (i.e. under controlled conditions in laboratory or microcosm experiments). This is beyond the scope of this paper.

Removal of the iron oxide coating is expected to occur mainly when the water table is high. Although continuous water table data are not available for the IRIS sites during the period of study, one can reasonably assume that anaerobic conditions and the reduction of iron oxide from the IRIS tubes at sites 3 and 5, and probably at site 4 occurred when water table depths were shallow. Dorau et al. (2016) indicated that monitoring of the water table in parallel with that of iron removal from IRIS tubes would produce more meaningful data to determine the removal of iron per unit of time (day or week) when the water table is within 30 cm of the soil surface. However, the intensity and duration of reducing soil conditions should be considered to result from multiple factors, and not water table depth only or any other individual soil property. The organic matter type and content, pH, soil temperature and microbial community can vary between sites, which makes it difficult to predict or determine the removal of iron per unit of time, even within a wetland.

6. Conclusions

This study demonstrates that IRIS tubes are of value to document the development of reducing conditions in saline and carbonate-rich wet soil from research at Gallocanta Lake where the water level fluctuates seasonally and annually. The identification of current reduction in the soil of different geomorphic and edaphic units around the lake confirms that previously observed macro and micromorphological redoximorphic features are probably developing at present, in spite of the intermittent dryness of the lake. The alkaline conditions combined with intermittent waterlogging make this research novel.

The differences in magnitude of iron oxide depletion from the IRIS tubes between sites show little association with soil composition or salinity, but seem to be related mainly to subtle differences in topography that control when the soil becomes saturated and reducing conditions persist. Interpretation of the processes and factors responsible for differences in the amount and patterns of iron depletion from the IRIS tubes between sites remain unsolved. This limitation of our field approach suggests that future research should be complemented with laboratory or microcosm experiments.



CAPÍTULO 7.

Soil fertility and plant nutritional status at the interface between saline habitats and agriculture

Soil fertility and plant nutritional status at the interface between saline habitats and agriculture

Resumen

El conocimiento sobre el estado nutricional del suelo y de las plantas en humedales salinos es escaso. La agricultura de secano en ambientes semiáridos requiere estrategias de gestión integradas para mantener la producción agrícola y conservar los hábitats salinos con alto valor ecológico. La interfase entre el borde del humedal y los cultivos adyacentes es clave para entender la dinámica de los nutrientes en esta zona. La fertilidad del ecosistema se ha estudiado en Gallocanta y Guallar, dos humedales salinos Ramsar de la Cuenca Hidrográfica del Ebro, NE de España, con un grado de aridez diferenciado. La fertilidad se estudia a lo largo de un transecto de suelo que se extiende desde el cultivo hacia el borde del humedal y se evalúa a través de las propiedades del suelo, el contenido de nitrógeno y fósforo en planta y suelo, los índices nutricionales de las plantas, y la biomasa. La salinidad del suelo (EC1:5) aumenta a lo largo del transecto hacia el humedal de 0.3 dS m⁻¹ a 3.7 dS m⁻¹ en Gallocanta, y de 2.1 dS m⁻¹ a 5.4 dS m⁻¹ en Guallar. Las propiedades de la parte más superficial del suelo muestran una alta variabilidad a lo largo del transecto. En promedio, los suelos son francos o arenoso-francos con una capacidad de intercambio catiónico de baja a moderada (CEC <20 cmol⁺ kg⁻¹), independientemente de la salinidad del suelo. El contenido medio de materia orgánica en el suelo es 2.1%, y el de carbonato de calcio equivalente 38.7%. En Guallar los suelos tienen un alto contenido de yeso (hasta 72.2%). Los índices nutricionales de las plantas indican que no hay limitación de nutrientes para el crecimiento de los cereales en Gallocanta, de acuerdo con los altos contenidos de N y P del suelo. El P disponible en los suelos agrícolas está por encima de los requerimientos del cereal (media = 65.8 mg kg⁻¹), y es bajo en la franja de halófitos (media = 2.4 mg kg⁻¹). En general, el contenido de nutrientes de las plantas está dentro de los rangos habituales aunque la alta relación N/P (16.2 en Gallocanta) en halófitos indica una limitación de fósforo para su crecimiento. No existe una relación clara entre la biomasa obtenida y las precipitaciones previas acumuladas para los cultivos. Se observa una disminución del contenido de nutrientes en el suelo a lo largo del transecto hacia el borde del humedal en Guallar, mientras que en Gallocanta el estado nutricional de la

planta muestra una distribución heterogénea relacionada con la variabilidad de las propiedades del suelo a lo largo del transecto. Estos resultados son útiles para desarrollar estrategias de manejo que concilien la producción y la conservación de hábitats protegidos.

La publicación de este capítulo está en preparación para la revista: *Agricultural system* (IF 2015: 2.86).

Abstract

There is a lack of knowledge about soil and plant nutrients in saline wetlands. Dry farmed agriculture in semiarid environments requires integrated management strategies to maintain the crop production and to preserve the saline habitats of high ecological value. The interface between the wetland and the adjacent crops is key to understand the interconnections regarding nutrients dynamic. The ecosystem fertility is studied in two Ramsar saline wetlands, Gallocanta and Guallar, with different grade of climatic aridity, in NE Spain. The fertility is studied along a soil transect extending from the crops to the wetland edge and assessed through soil properties, nitrogen and phosphorous content in plant and soil, plant nutritional indexes, and biomass. Soil salinity (EC1:5) increases along the soil transect towards the lake, from 0.3 dS m⁻¹ to 3.7 dS m⁻¹ in Gallocanta, and from 2.1 dS m⁻¹ to 5.4 dS m⁻¹ in Guallar. The properties of the uppermost layer of the soil show a high variability along the transect. On average, soils are loamy or sandy loamy with a low to moderate cation exchange capacity (CEC < 20 cmol+ kg⁻¹) regardless their salinity. They have a mean organic matter content of 2.1% and 38.7% of calcium carbonate equivalent, and in Guallar the soils have high gypsum content (up to 72.2%). The nutritional indexes reveal that there are non-limiting nutrients for cereal growth in Gallocanta, in agreement with N and P soil contents. The available P is above the cereal requirements in agricultural soils (mean = 65.8 mg kg⁻¹), and it is low in the halophytes fringe (mean = 2.4 mg kg⁻¹). In general, the plant nutrients are within the usual ranges for both cereals and halophytes, though the high N/P ratio (16.2, in Gallocanta) of halophytes indicates a phosphorous limitation for growth. There is not a clear relationship between the biomass obtained and the accumulated rainfall for crops. A decrease of soil nutrients is observed along the transect, towards the wetland edge in Guallar whereas in Gallocanta the plant nutritional status show a heterogeneous distribution related to the variability of soil properties along the transect. The results are useful to develop management strategies which reconcile sustainable agriculture and the conservation of protected habitats.

Keywords: Habitats Directive, halophyte, Monegros, nitrogen, phosphorous, soil salinity, saline wetland.

1. Introduction

Wetlands support a great diversity of terrestrial and aquatic environments and host different habitats associated with their hydrological regime (Sharitz et al., 2014). Though the increasing worldwide recognition of the wetlands values and their scientific interest, the agricultural intensification together with the historical misperception of wetlands, has led to their loss and degradation. Wetlands of arid regions has been especially damaged due to their episodic flooding (Williams, 2002; Herrero and Castañeda, 2009), even if they are protected or included in the Ramsar List (Ramsar Convention Secretariat, 2010). During the 20th century more than half of the wetlands around the world have been lost (Mitsch and Gosselink, 2015). In Spain, Casado and Montes (1995) estimated a loss of 60% of the total surface area of wetlands during the last 200 years.

A sustainable agriculture is required in order to preserve wetlands in agricultural landscapes. Soil fertility has been studied mainly to predict the amount of nutrients needed to increase crop yield, especially in soils with poor nutrient availability (Belachew and Abera, 2010). However, soil fertility has been less investigated in wetlands with the exception of the interest on rice cultivation areas (Seneviratne et al., 1994; Buri et al., 1999; Edem and Ndaeyo, 2009; Wang et al., 2011), and submerged soils (Sahrawat, 2015), also for agricultural production. The variability of the physical and chemical soil properties of interest in agriculture has been investigated under different crop managements (Álvarez-Solís et al., 2007) and at different landscape positions (Scotney and Dijkhuis, 1990). At the interface between wetlands and their adjacent agricultural fields, the variability of soil properties has been investigated by Stolt et al. (2001) and Yoon et al. (2015) in order to increase the knowledge about wetlands ecosystems functions. The effect of soil fertility on plant nutrient status is frequently investigated under controlled conditions (Jouany et al., 2004; Guzys and Miseviciene, 2015) or following laboratory or greenhouse experiments (Christie and Moorby, 1975; Gough and Marrs, 1990; Fort et al., 2015).

Inland wetlands in agricultural landscapes usually comprise fringes of natural vegetation. These transitional areas, from crops to natural vegetation, are suitable for the study of the ecosystem fertility since they represent a continuum of habitats where nutrient exchange between aquatic and terrestrial environments takes place (Zhao et al., 2016). These natural fringes usually reduce the flows and inputs of agrochemicals within the wetland (Vought et al., 1994; Silvan et al., 2004).

Wetlands in arid regions are characterized by intermittent flooding and, frequently, soil salinity due to the scarce and irregular rainfall and the high evapotranspiration. Moreover, the use of fertilizers to cope with the poor soil conditions (Parida and Das, 2005; Grieve et al., 2011) contribute to the water flows with pollutants towards the low lying areas. This is common in several saline wetlands of the Ebro Valley, in Spain, which

receive agricultural inflows of fresh water enriched by nutrients coming from irrigation (Díaz et al., 1998; Valero-Garcés et al., 2000).

There are no available studies about ecosystem fertility in saline environments. They have only been addressed for salt pasture production (Bennett et al., 2009), to understand the relation between plant nutrients and soil properties in temperate grasslands along a saline gradient (García and Mendoza, 2008), or in coastal saline marshes (Rathore et al., 2016). The aim of this study is to characterize the soil fertility and the plant nutrient status in inland saline wetlands protected under biodiversity conservation legislation and subjected to agricultural intensification. For this purpose we have selected two Ramsar saline wetlands which represent a different grade of climatic aridity within the Ebro Basin, NE Spain. The wetland fringe is a suitable transitional area for the study of the interactions between natural vegetation and crops.

2. Ramsar Wetland sites

Gallocanta and Guallar (Figure 1) are two hypersaline Ramsar wetlands protected under the Habitats and Birds Directives of the European Union and subjected to agricultural intensification. Gallocanta, with 14.4 km², is the largest saline lake in western Europe. It is located at 1000 m a.s.l. in the Iberian Range (Figure 1) under a dry semiarid climate (Liso and Ascaso, 1969), with a mean rainfall of 488 mm yr⁻¹ for the last 70 years, a mean annual temperature of 11.2 °C for the period 1969-2015, and a mean hydric deficit of 605 mm yr⁻¹ (García-Vera and Martínez-Cob, 2004). The dry winds of prevailing NW direction are very common, especially in winter (Martínez-Cob et al., 2010). Guallar, with 0.15 km², is located at 336 m a.s.l. in the Monegros desert (NE, Spain), Figure 1. This is one of the most arid regions in Europe (Herrero and Snyder, 1997), with a mean annual rainfall of 350 mm (1974 - 2014), a mean annual temperature of 14.9 °C (Castañeda et al., 2013b), and 1255 mm yr⁻¹ of mean reference evapotranspiration (Faci and Martínez-Cob, 1991), which contribute to the hydric deficit (mean = 867 mm yr⁻¹).

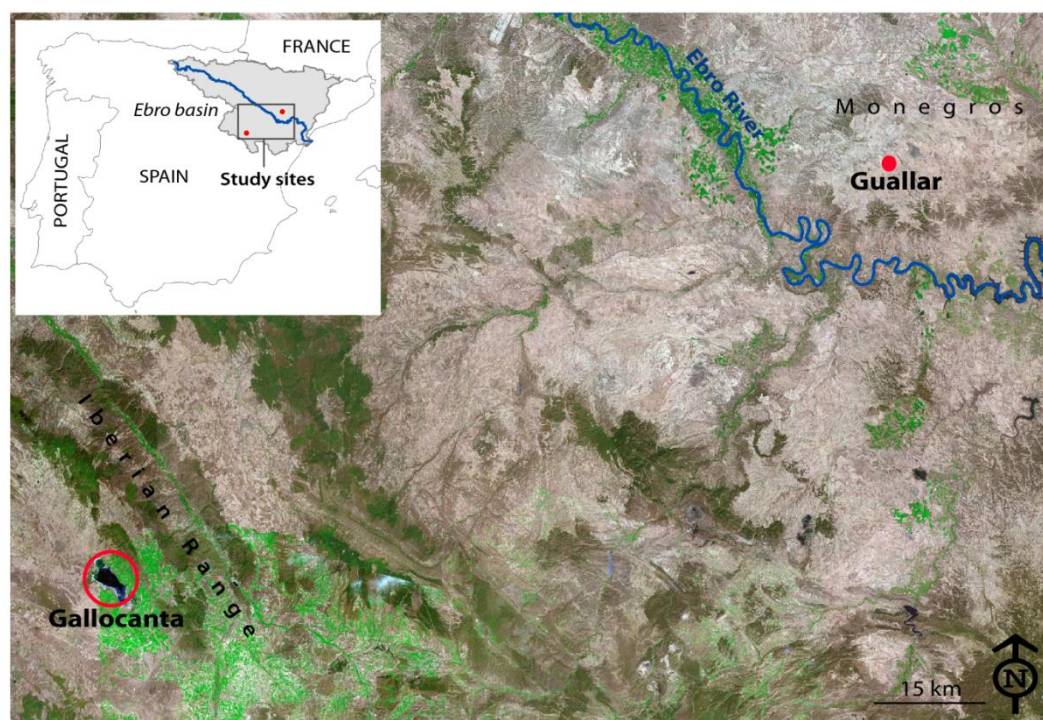


Figure 1. Location of Guallar and Gallocanta Ramsar wetlands in the Ebro basin (inset) and on a false color composition (RGB 123) of the SPOT 5 image from 2009.

Water level fluctuations and intermittent desiccation constitute the most outstanding features of the two saline wetlands. They fit the functional description of playa-lakes given by Shaw and Thomas (1997). The maximum registered lake water depth is 2.84 m in Gallocanta, in 1974 (Pérez-Bujarrabal, 2014), and 0.26 m in Guallar in 1997 (Castañeda, 2002). The action of wind and water has promoted the formation of littoral landforms associated to the two lakes. In Gallocanta, the southern sedimentary margin includes sandy barrier islands, lagoons, and sublittoral bars (Castañeda et al., 2013), and a gypsum-rich lunette has formed on the leeward margin of Guallar (Mees et al., 2012).

The natural vegetation consists mostly on annual and perennial halophytes distributed in concentric fringes around the bare saline lake floor according to their tolerance to soil salinity and flooding (Gómez et al., 1983; Conesa et al., 2011). Some of the halophytes, such as *Puccinellia pungens* are protected species. *P. pungens* is protected under the Habitats Directive and the Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Moreno, 2013). Crops consists of winter cereals, mainly barley, soft and durum wheat. In Guallar area, the agricultural practices include traditional cereal-fallow rotation (McAneney and Arrúe, 1993).

3. Material and methods

3.1. Sampling design

Soil and vegetation sampling was performed in Gallocanta and Guallar wetlands during three field campaigns in: April (9-16) 2013, May (25-29) 2014, and April (9-10) 2015. In each wetland the sampling sites were located in a transect extending from the edge of the wetland (excluding the bare bottom) to the agricultural land. The two transects represent a continuous topographic gradient and include the halophytes fringe and the adjacent crops (Figure 2).

In Guallar (GLR), the three sampling sites were located at the SE margin of the playa-lake, along a transect of 200 m and a mean slope of 1.4% (Figure 2A). GLR3 and GLR7 correspond to the halophyte fringe and include species such as *Suaeda vera*, *Sphenopus divaricatus*, and *Hymenolobus procumbens*. The adjacent agricultural plot, GLR6, was fallow in 2013 and 2015, and cropped with wheat (*Triticum aestivum*) in 2014.

Six sampling sites were set along a distance of 1100 m at the southern margin of Gallocanta Lake (GA), where the halophyte fringe reaches a width of about 800 m with a mean slope of 0.3% (Figure 2B). The halophytes fringe (GA19, GA20 and GA21) include plant communities of *Salicornia* sp., *Puccinellia* sp., and *Limonium* sp. (Figure 2B). Three sites (GA31, GA32 and GA22) were sampled on agricultural plots, with two of them, GA31 and GA32, representing sites of the same plot but with differences in cereal growth. The plots were cultivated with wheat (*Triticum aestivum*) in 2013 and 2015, and barley (*Hordeum vulgare*) in 2014.

The use of fertilizers in Guallar is not very common though NPK (8-15-15) fertilizers can be added in spring, corresponding to 16 kg ha⁻¹ N, 1.2 kg ha⁻¹ P and 24.9 kg ha⁻¹ K. In Gallocanta, 160–200 kg ha⁻¹ of completed NPK (12-20-12) fertilizer is usually applied at sowing. This corresponds to 16 kg ha⁻¹ N, 10.6 kg ha⁻¹ P and 33.2 kg ha⁻¹ K. About 160-200 kg ha⁻¹ of calcium ammonium nitrate (CAN-27) can also be applied in spring, representing 43-54 kg ha⁻¹ of N.

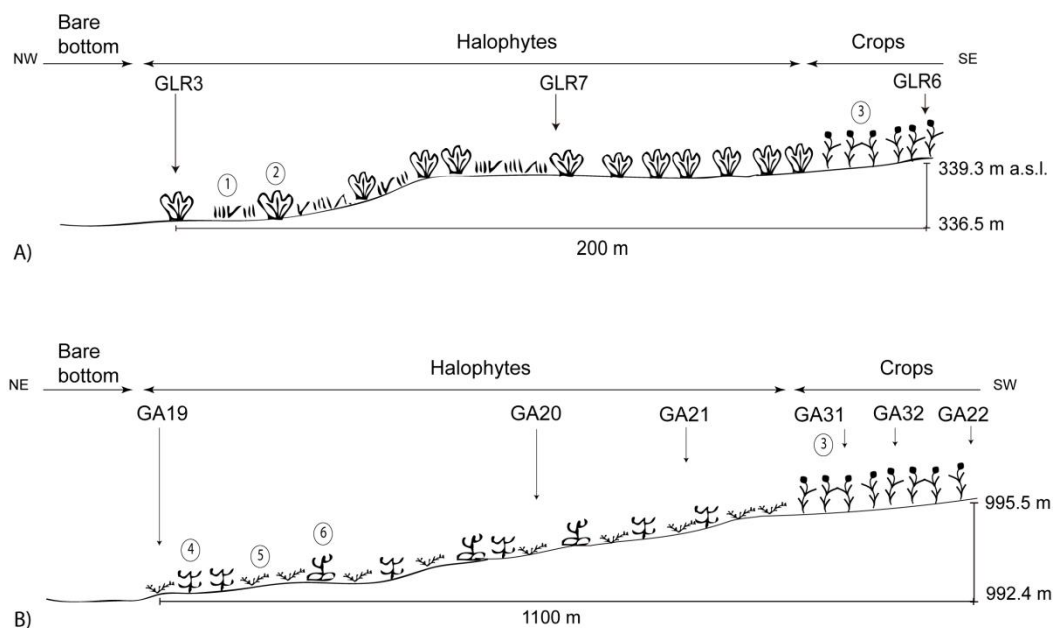


Figure 2. Schema of the topographic cross-section and distribution of sampling sites along the soil transects in Guallar (A) and Gallocanta (B). Plant design is adapted from Conesa et al. (2011): 1. *Sphenopus divaricatus* and *Hymenolobus procumbens*, 2. *Suaeda vera*, 3. Winter cereals, 4. *Salicornia* sp., 5. *Puccinellia* sp., and 6. *Limonium* sp. communities.

3.2. Plant and soil sampling

A total of nine sites were sampled, three in Guallar and six in Gallocanta (Figure 2). In each site, the aerial part of the vegetation was collected within a quadrat of 0.25 m² together with a composite sample of the upper 5 cm of soil, or 25 cm in agricultural plots. Three quadrat vegetation replicates were taken to have pooled samples in sites with very small amount of vegetation or with heterogeneous vegetation from the point of view of height and coverage. During the 2013 campaign, the vegetation was absent in three sites, GA20, GA21, and GLR6. In the later, the spring weeds were harvested in 2015.

Vegetation samples were weighted before and after drying at 60 °C for 48 hours, and then milled to a 1 mm particle size using an industrial grinder. Soil samples were air-dried and sieved to a grain size of 2 mm for subsequent chemical analysis. Surface water of wetlands was collected in 2013.

3.3. Soil characterization

Soil salinity was measured with a conductivity cell (Orion 013605MD) and expressed as the electrical conductivity of the 1:5 soil:water extract (EC1:5) in dS m⁻¹ at 25 °C. Soil pH was measured in the 1:2.5 soil:water extract with a pH electrode (Orion 9157BNMD). Calcium carbonate equivalent, CCE, was determined by gasometry, and

gypsum content by thermogravimetry (Artieda et al., 2006). Soil organic carbon, SOC, was analyzed by chromic-acid digestion and spectrophotometry with a UV/V UNICAM 8625 spectrophotometer following Heanes (1984). Particle size distribution, PSD, was assessed by laser diffraction with a correction for the clay content following Taubner et al. (2009).

Soil fertility was assessed through the Total and the Available phosphorous, P, the Total nitrogen, N, and the soil cation exchange capacity, CEC. Total P content in soil was determined by Inductively Coupled Plasma (ICP) following calcination at 550 °C during 5 hours and wet digestion by HF and HClO₄ (NF X 31-147). Total N content was determined by dry combustion (ISO 10694 and ISO 13878). Both nutrients were determined in soil samples from 2013. Available P was determined with Olsen et al. (1954) method. The exchange cations were determined by Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) in soil samples from 2015. Electrical conductivity and the pH of water samples were also measured.

3.4. Plant characterization

P content in plant was determined after digestion in H₂SO₄-H₂O₂ by the malachite green colorimetric method of Van Veldhoven and Mannaerts (1987) and spectrophotometry. N content was determined with a CN gas analyzer (Elementar Vario Cube, Hanau, Germany). P nutrition index (PNI) was calculated according to the equation proposed by Duru and Ducrocq (1997), and N nutrition index (NNI) following Lemaire et al. (1989) for natural vegetation, and following Justes et al. (1994) for wheat. The relationships between the soil and plant properties were established using the Pearson's correlation coefficient.

The accumulated rainfall and the heat use efficiency (HUE) of vegetation were computed to characterize the conditions for plant development during the growing season. Data from Tornos (see Chapter 2, Figure 4) and Valfarta weather stations were used for Gallocanta and Guallar, respectively. The growing season was considered from October 1st for crops and from February 1st for halophytes, the later following Fitter et al. (1995), until the sampling date. The sampling date was in April because the nutrition indices are valid until flowering, before the remobilization of nutrients during the reproductive stages and also to have growth conditions without water limitation. The HUE of crops and halophytes was calculated as the biomass (dry matter yield, DMY) produced per unit of thermal time (TT), and expressed in kg ha⁻¹ °Cday⁻¹. The TT was calculated as the summation of the cumulative differences in temperature between the daily mean temperature and the base and optimum temperature, and expressed in °Cday. The base temperature was considered 10 °C for wheat (Girijesh et al., 2011) and 0 °C for halophytes and an optimum temperature of 18°C for halophytes (Theau and Zerourou, 2008; Niqueux and Arnaud, 1967).

4. Results

4.1. Soil salinity and composition

As expected, soil salinity increases along the soil transect towards the lake (Figure 3). Regarding the mean electrical conductivity (EC1:5) per sampling site, in Gallocanta it ranges from 0.3 dS m⁻¹ at the outermost agricultural soil to 3.7 dS m⁻¹, at the innermost halophyte site. Higher salinity occurs in Guallar along the whole transect, from 2.1 dS m⁻¹ in the cereal to 5.4 dS m⁻¹ at the lake edge. Taking into account the mean salinity values per site (Table 1), the halophytes show up to 12 times higher soil salinity than the agricultural soils in Gallocanta, and up to 2.5 times in Guallar.

Taking into account the salinity phases for agriculture (Nogués et al., 2006), Gallocanta soils are very strongly saline (mean ECe = 22.9 dS m⁻¹) near the lake (GA19, GA20) and non-saline or slightly saline (mean ECe = 2.2 dS m⁻¹) in the crops (GA22 to GA31). In Guallar, the halophytes fringe have also very strongly saline soils (mean ECe = 29.2 dS m⁻¹). The standard deviation values (Table 1) indicate that the interannual variability of soil salinity is higher in the halophytes area than in agricultural soils, especially at the intermediate site of the halophytes fringes, GA20 in Gallocanta and GLR7 in Guallar (Figure 3).

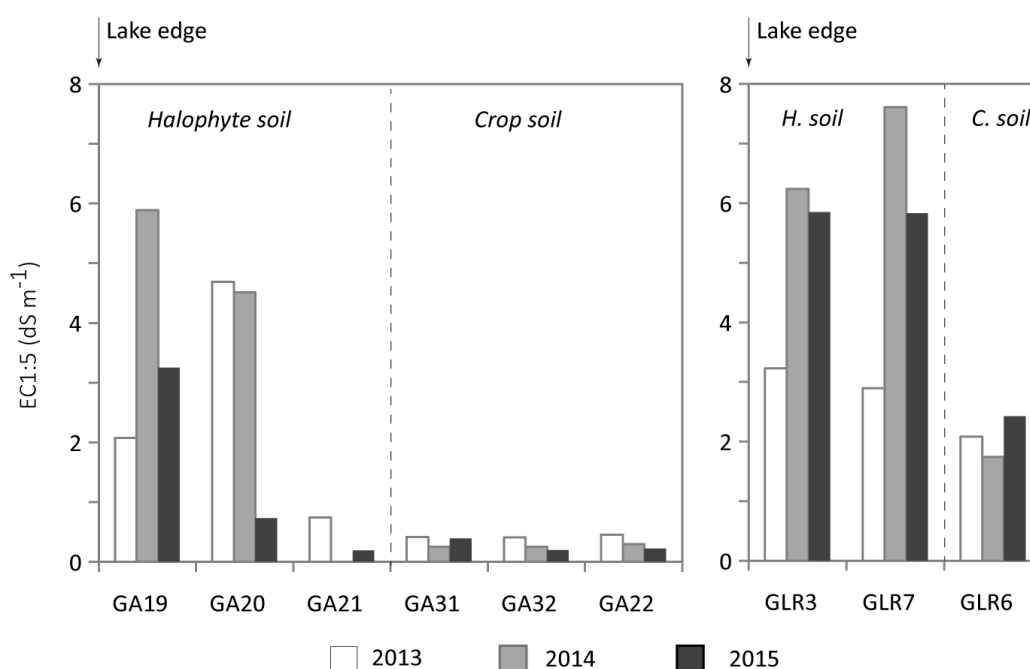


Figure 3. Soil salinity (EC1:5) of Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) soils sampled along a transect from halophytes to crops, between 2013 and 2015.

Soils are slightly alkaline, with pH ranging between 7.3 and 8.1. The mean organic matter content is 2.1%, varying from 1.2% to an exceptionally high value of 3.8% in the halophytes soil GLR7. In general, calcium carbonate equivalent (CCE) content is high,

from 29% to 51%, excepting the soil at the Guallar edge, GLR3, with 17% of CCE (Figure 4 and Table 1). Soils of Guallar have a high gypsum content which increases towards the lake edge, up to 72% in GLR3 (Table 1 and Figure 4). The sum of gypsum and CCE in this soil (89.6%) reveals a very low content on siliceous-silicatic material in this soil (Figure 4A). Overall, soils are loamy or sandy loamy, and the soils found at the edge of the two wetlands exhibit a high percentage of sand-sized material, 87.3% and 88.7% in Gallocanta and Guallar, respectively (Table 1 and Figure 4B).

Table 1. Mean (\pm standard deviation) of soil physical and chemical properties at Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) sites and the surface water samples. EC1:5 Electrical conductivity (soil:water 1:5 extract), pH1:2.5 of the soil:water 1:2.5 extract, CCE: calcium carbonate equivalent.

Sampling site	EC1:5 dS m ⁻¹	ECe*	pH1:2.5	Gypsum	CCE	Organic matter	Sand %	Silt	Clay	USDA Textural class
<i>Gallocanta</i>										
GA19	3.7 \pm 2.0	24.3	7.3 \pm 0.2	3.7 \pm 1.1	33.8 \pm 2.6	1.8 \pm 0.1	87.3 \pm 1.4	12.1 \pm 1.4	4.15 \pm 0.02	Loamy sand
GA20	3.3 \pm 2.2	21.5	7.7 \pm 0.2	3.2 \pm 0.8	47.2 \pm 4.6	2.3 \pm 0.1	52.2 \pm 1.4	27.3 \pm 1.3	20.5 \pm 0.1	Sandy clay Loam
GA21	0.5 \pm 0.4	3.0	8.0 \pm 0.2	1.3 \pm 0.3	29.1 \pm 11.4	2.3 \pm 0.0	78.6	16.6	4.7	Loamy sand
GA31	0.4 \pm 0.1	2.3	7.6 \pm 0.4	2.1 \pm 0.6	48.2 \pm 5.4	2.1 \pm 0.7	61.7 \pm 2.7	27.2 \pm 1.5	11.1 \pm 4.2	Sandy loam
GA32	0.3 \pm 0.1	1.9	8.1 \pm 0.3	1.4 \pm 0.5	39.9 \pm 2.7	1.3 \pm 0.5	73.0 \pm 10.87	21.8 \pm 6.2	5.2 \pm 4.7	Sandy loam
GA22	0.3 \pm 0.1	2.1	8.1 \pm 0.2	2.2 \pm 0.3	47.4 \pm 0.8	2.3 \pm 0.1	62.7 \pm 4.1	26.2 \pm 0.1	11.1 \pm 4.2	Sandy loam
<i>Guallar</i>										
GLR3	5.1 \pm 1.6	27.6	7.9 \pm 0.7	72.2 \pm 7.1	17.4 \pm 5.3	1.2 \pm 0.9	88.7 \pm 1.2	9.6 \pm 1.2	1.7 \pm 0.0	Sand
GLR7	5.4 \pm 2.4	30.7	7.6 \pm 0.1	17.2 \pm 6.5	33.9 \pm 4.4	3.8 \pm 0.1	37.7 \pm 0.3	45.26 \pm 0.02	17.01 \pm 0.2	Loam
GLR6	2.1 \pm 0.3	**	7.5 \pm 0.2	8.5 \pm 4.6	51.3 \pm 5.4	1.9 \pm 0.1	44.3 \pm 16.3	40.1 \pm 10.6	15.5 \pm 5.7	Loam
<i>Surface water</i>										
	EC		pH							
GLR	170.5		6.3							
GA	39.9		7.2							

*Estimated with data from Castañeda et al. (2015) for Gallocanta, and from unpublished data for Guallar.

** Not estimated due to the uncertainty: a part of the EC1:5 value must be due to the gypsum content.

The surface water is hypersaline, especially in Guallar ($EC = 170.5 \text{ dS m}^{-1}$) with up to four times the salinity of ocean water and 4.3 times higher than in Gallocanta ($EC = 40 \text{ dS m}^{-1}$). The pH of surface water is 7.2 in Gallocanta and 6.3 in Guallar (Table 2).

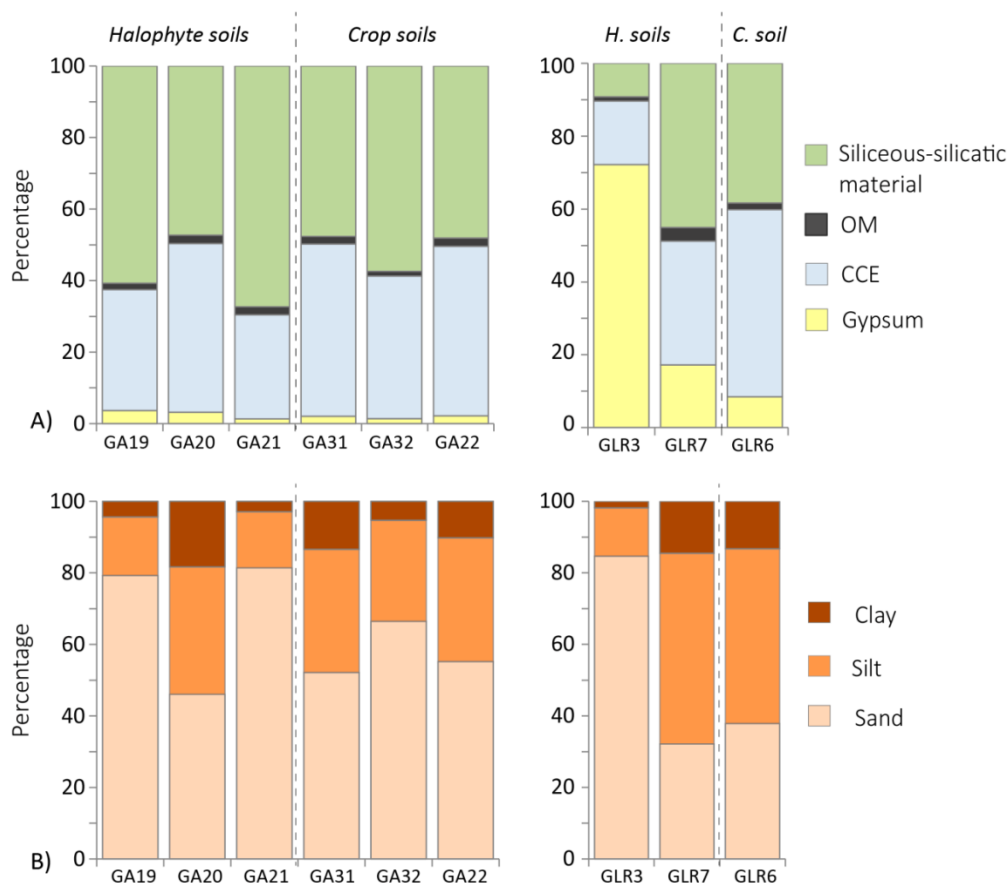


Figure 4. A) Gypsum, calcium carbonate equivalent (CCE), organic matter (OM) and siliceous-silicatic material in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR). B) Particle size distribution (clay, silt and sand) in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR).

4.2. Ecosystem fertility

4.2.1. Soil nutrient content and cation exchange capacity

The nitrogen content varies between 0.94 g kg^{-1} and 1.74 g kg^{-1} in Gallocanta, and between 0.97 g kg^{-1} and 2.92 g kg^{-1} in Guallar. The total P ranges from 0.11 g kg^{-1} to 1.57 g kg^{-1} in Gallocanta and between 0.58 g kg^{-1} and 1.85 g kg^{-1} in Guallar, and the available P varies between 2.3 mg kg^{-1} and 66.7 mg kg^{-1} in Gallocanta, and between 2.2 mg kg^{-1} to 23.8 mg kg^{-1} in Guallar (Table 2).

Agricultural soils of Gallocanta show higher phosphorous content than the halophytes fringe, with available P being 16 times higher in agricultural plots (mean 65.8 mg kg^{-1}) than in the halophytes fringe (mean 4.1 mg kg^{-1}). The halophytes soil at the lake

edge (GA19) is an exception, with a relative high though variable available P content (7.4 mg kg^{-1}). The nitrogen content is similar in all the sites along the transect (mean = 1.36 mg kg^{-1}) though a slightly decrease is observed within the halophytes fringe towards the lake, from 1.6 to 1.2 g kg^{-1} .

Overall, Guallar soils show a decrease of nutrients content towards the wetland edge, with about twice more P and N content in the agricultural soil than in the halophytes fringe.

The cation exchange capacity (CEC) of sampling soils is low to moderate and very variable along the transects, between $2.4 \text{ cmol+ kg}^{-1}$ and 14 cmol+ kg^{-1} . The CEC shows a significant negative correlation with sand-sized particles content ($r = -0.73$, $p < 0.05$). The lowest CEC value corresponds to the gypsum-rich soil of the Guallar edge, GLR3, where the siliciclastic material only account for about a 10% of the soil components (Figure 4A). The slightly saline agricultural soil, GA22, and the very strongly saline soil of *Suaeda vera*, GLR7, exhibit the maximum CEC value.

Table 2. Soil and plant nutrient content, and CEC (cation exchange capacity) in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR). Mean \pm standard deviation. DMY: dry matter yield; PNI: Phosphorous nutritional index; NNI: nitrogen nutritional index. Grey shadowed rows correspond to the halophytes fringe.

Sampling site	Soil					Plant					
	CEC	Total P	Available P	Total N	C/N	P	N	N/P	DMY	PNI	NNI
	cmol+ kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		‰	%		t ha ⁻¹	%	%
<i>Gallocanta</i>											
GA19	9.1	0.545	7.4 \pm 5.2	1.2	8.8	1.6 \pm 0.3	1.9 \pm 0.6	11.5	3.7 \pm 2.2	59.5 \pm 0.2	54.5 \pm 3.9
GA20	11	0.581	2.3 \pm 0.3	1.3	10	0.7 \pm 0.04	1.2 \pm 0.2	18.1	3.0 \pm 0.3	29.1 \pm 0.2	35.7 \pm 6.9
GA21	9.2	0.109	2.6 \pm 0.6	1.62	8.1	0.7	1.3	19	2.2	29.7	36.2
GA31	12.6	1.57	66.7 \pm 12.7	1.34	9.2	4.3 \pm 1.2	3.3 \pm 0.9	7.7	3.0 \pm 2.2	116.8 \pm 13.4	93.6 \pm 41.4
GA32	7.4	1.26	66.2 \pm 4.2	0.94	8.2	3.9 \pm 1.5	3.7 \pm 1.5	9.4	4.2 \pm 3.1	98.4 \pm 14.9	109.7 \pm 27.5
GA22	14.2	1.03	64.5 \pm 20.7	1.74	7.7	3.5 \pm 1.2	3.4 \pm 1.8	9.5	4.3 \pm 4.1	95.4 \pm 4.3	91.0 \pm 35.9
<i>Guallar</i>											
GLR3	2.4	0.575	2.2 \pm 0.0	0.97	7	1.5 \pm 0.5	1.8 \pm 0.4	12.2	3.6 \pm 0.7	55.39 \pm 16.08	56.8 \pm 12.25
GLR7	14.1	1.38	16.9 \pm 3.9	1.47	15	1.4 \pm 0.4	1.9 \pm 0.1	12.7	6.9 \pm 1.2	54.1 \pm 13.5	72.01 \pm 8.08
GLR6 crop	11.2	1.85	23.8 \pm 11.1	2.92	3.7	1.3	0.8	6.2	8.2	62.6	37.4
GLR6 weeds						2.03	1.8	8.9	2.7	76	51.4

4.2.2. Nutritional status of plants

Regarding the plant nutrients per sampling site, in Gallocanta the phosphorous content varies between 0.7‰ (GA20, *P. pungens*) and 4.3‰ of cereals, and the nitrogen content varies between 1.2‰ (GA20, *P. pungens*) and 3.7‰ (cereal). In Guallar, the wheat shows a noticeable low content of nutrients compared to the cereal in Gallocanta, 1.3‰ phosphorous and 0.8‰ nitrogen. The spring weeds collected in 2015 display higher nutritional status than the cereal, with 2.0‰ phosphorous and 1.8‰ nitrogen (Table 2).

The mean phosphorous content of cereals is 3.9‰ in Gallocanta, almost 4 times the halophytes mean (1‰), and the mean nitrogen content of cereals is 3.5‰, about 2.3 times the halophytes mean (1.5‰). In contrast, the mean nitrogen content of the halophytes (1.9‰) and weeds (1.8‰) in Guallar is almost twice the nitrogen content of the cereal (0.8‰) and wheat P is also slightly higher than the P of *Suaeda vera* (Table 2 and Figure 5). In Gallocanta, the P content shows local differences within the cereal, with a slight increase from 3.5‰ to 4.3‰ downwards to the lake (Table 2).

It seems that the soil salinity does not condition the N and P content of plants because there are not significant correlations. Overall, the annual variability of the nutrient content of crops is much higher than that of halophytes (Table 2 and Figure 5). All the sampled sites in the two wetlands show the lowest plant nutrient content in the second sampling year, 2014 (Figure 5).

The nutritional indexes, PNI and NNI are higher in crops than in halophytes, similarly to the plant nutrient content (Table 2). The mean crop NNI and PNI values are around 100% in Gallocanta, indicating that there is no limitation of nutrients for cereal growth. In contrast, the nutritional indexes of wheat in Guallar are below the critical value of 80% indicating that the cereal growth is limited. The *Suaeda vera*, GLR7, has the highest NNI value (72%) and the lowest PNI (54%). The spring weeds have PNI (76.02%) and NNI (51.4%) values higher than the wheat.

Regarding the halophytes fringe, the nutrient content and the nutritional indexes are higher at the lake edge in Gallocanta, whereas in Guallar this pattern is not evident. The plant N/P ratio ranges from 7.7 to 19.0 in Gallocanta, and from 6.2 to 12.7 in Guallar (Table 2). On average, the halophytes show higher N/P ratio (14.7) than crops (8.6).

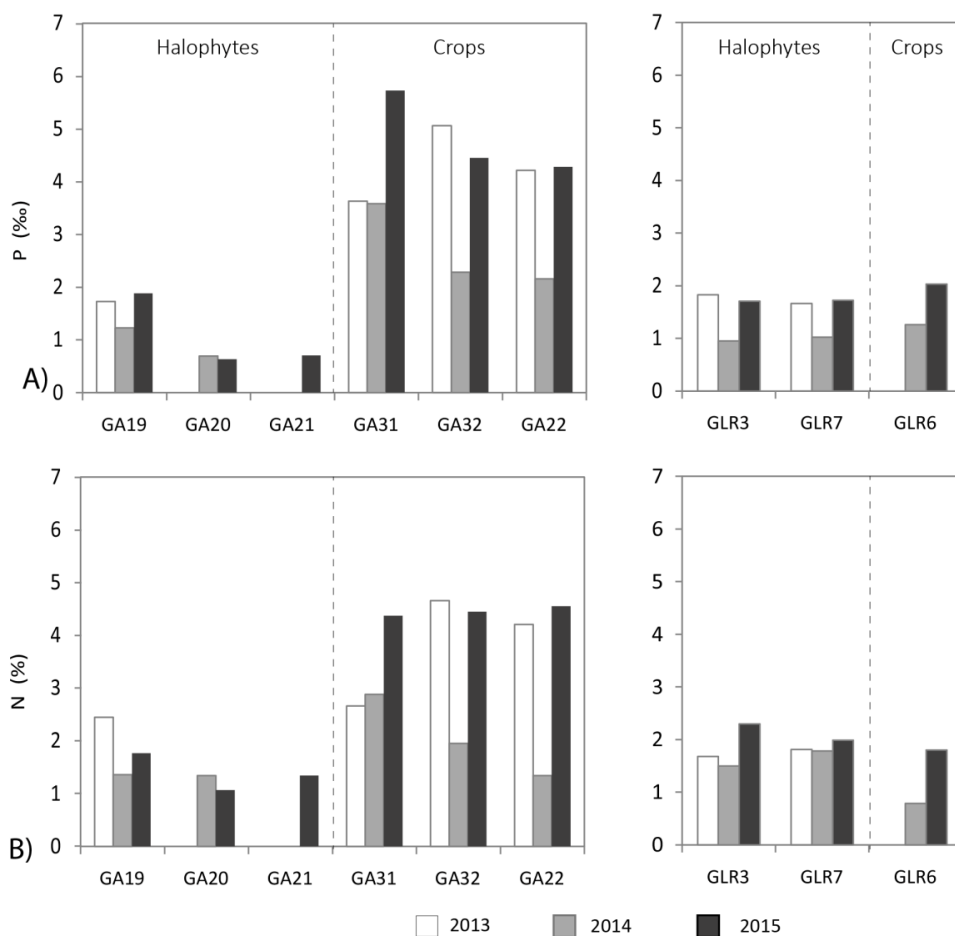


Figure 5. A) Phosphorous and B) Nitrogen content of vegetation in Gallocanta (GA) and Guallar (GLR) wetlands.

4.2.3. Biomass variability

The mean biomass per site in Gallocanta varies between 2.2 t ha⁻¹ of halophytes and 4.3 t ha⁻¹ of crops, and in Guallar between 3.6 t ha⁻¹ of halophytes and 8.2 t ha⁻¹ of wheat, being 2.7 t ha⁻¹ for the spring weeds (Table 2). In general, the mean biomass is similar for crops (3.8 t ha⁻¹) than for halophytes (3.9 t ha⁻¹). The biomass shows a decrease along the transects towards the wetlands, with the exception of Gallocanta halophytes which show a biomass increase towards the wetland edge (Table 2).

The halophyte biomass of both wetlands seems not to be conditioned by soil salinity. A negative significant correlation is shown by the halophytes biomass and the soil gypsum content in Guallar ($r = -0.88$, $p < 0.05$, $n = 6$) whereas the relationship is positive with CCE content ($r = 0.83$, $p < 0.05$, $n = 6$). The biomass calculated as DMV in spring (April-May) shows a very high variability, with a standard deviation which can suppose up to 95% of the biomass value. Local differences of about 1.2 t ha⁻¹ are also observed between GA31 and GA32, in the same agricultural plot (Figure 2B).

During the 3-year study period, the aridity of the Guallar area is evidenced by the 20% lower accumulated rainfall and the 200 °Cday higher thermal time, compared to Gallocanta area (Table 3).

The accumulated rainfall computed for crops in Gallocanta is 347.2 mm, 235.1 mm, and 255.9 mm, in 2013, 2014 and 2015, respectively. In Guallar it is 282.1 mm, 215.8 mm and 211.8 mm, respectively. Taking into account the accumulated rainfall computed for crops and halophytes, the first growing season, 2013, is the wettest of the study period, excepting the halophytes value in Guallar (Table 3).

The heat use efficiency of halophytes is highly variable, between 2.9 kg ha⁻¹ °Cday⁻¹ and 9.6 kg ha⁻¹ °Cday⁻¹ (Table 3). The HUE of the crops is higher than that of the halophytes, being the maximum 18.7 kg ha⁻¹ °Cday⁻¹ in Gallocanta and 13.7 kg ha⁻¹ °Cday⁻¹ in Guallar, both values obtained in 2014.

In general, the rainfall accumulated during the growing season does not show any relationship with the heat use efficiency. The Gallocanta cereal is an exception, because the accumulated rainfall shows a significant correlation with HUE ($r = -0.74$, $p < 0.05$) and with biomass ($r = -0.74$, $p < 0.05$). This cereal biomass also shows a significant correlation with TT ($r = 0.93$, $p < 0.001$).

Table 3. Sampling date, growing season days, accumulated rainfall during the growing season each year (Rainfall), thermal time (TT), mean dry matter yield (DMY) and heat use efficiency (HUE) for halophytes and crops each year, at Gallocanta and Guallar wetlands.

Year	Sampling day	Halophytes					Crops				
		Growing season day	Rainfall mm	TT °Cday	DMY t ha ⁻¹	HUE kg ha ⁻¹ °Cday ⁻¹	Growing season day	Rainfall mm	TT °Cday	DMY t ha ⁻¹	HUE kg ha ⁻¹ °Cday ⁻¹
Gallocanta											
2013	Apr, 16	75	145.7	483.5	1.42	2.9	198	347.2	150.9	1.47	9.7
2014	May, 25	114	101.1	1106.9	4.55	4.1	237	235.1	394.0	7.35	18.7
2015	Apr, 09	68	109.5	312.3	2.95	9.5	191	255.9	187.5	2.72	14.5
Guallar											
2013	Apr, 16	75	101.6	655.3	5.23	8.0	198	282.1	253.0		
2014	May, 29	118	103.3	1411.7	4.76	3.4	241	215.8	601.3	8.24	13.7
2015	Apr, 10	69	58.73	595	5.72	9.6	192	211.8	330.1	2.68	8.1

5. Discussion

5.1. Soil properties and ecosystem fertility

The two saline environments studied show a high variability of soil properties (soil texture and composition, CEC, and nutrients) in the uppermost layer of the soil along the transects. These differences must be related to the variety of soils formed at the margins of the lakes, which in turn is associated with the heterogeneity of perilacustrine landforms, especially in Gallocanta (Castañeda et al., 2013a; 2015) due to the significant size of the lake (1440 ha). As a result, the concentric fringes of the studied wetlands correspond to successive lacustrine episodes which differ in soil properties. Actually, the conspicuous pattern of agricultural fields in narrow strips (typical width 30 m), oriented perpendicular to the lake margin, results from the division of the land in plots with similar value in terms of their soil agricultural aptitude. Moreover, the upper soil layer is the most influenced by the present-day lacustrine processes associated with the intermittent flooding of the lake.

The minor size of Guallar wetland (15 ha), together with the relatively higher slope of the sampling transect (1.4%, Figure 2A) and the lower flooding frequency due to the aridity, restrain the effect of the lacustrine processes on the wetland margins, leading to a simpler succession of very distinct environments. Besides, the shorter length of the soil transect sampled in this wetland, seems to ease the recognition of gradients in the soil properties, such as the increase in soil salinity, pH and gypsum content, and the decrease of carbonate content towards the Guallar edge. The distribution of the soil nutrients along the Guallar transect, decreasing towards the wetland edge, is probably due to the mobilization of nutrients by runoff or subsurface water flows towards the wetland. In other palustrine areas (Stolt et al., 2001), and especially, in agricultural fields (Franzen et al., 2006), the spatial variability of soil properties are also associated with the sites location, especially with topography and slope.

Concerning the CEC of agricultural soils (less than 20 cmol⁺ kg⁻¹), it is below the CEC value reported by Garrido (1994) as indicative of a poor soil for crop production. The low to moderate capacity to exchange cations of the studied soils is similar to that observed in other saline wetland soils with very low clay content (Edem and Ndaeyo, 2009). The particle size distribution of soil conditions the fertility of the ecosystem and the agricultural potential by limiting the nutrient fixation (Scotney and Dijkhuis, 1990; Abe et al., 2009). The overall high percentage of sand-sized grains of the studied soils makes the soil nutrient retention capacity low (Gaines and Gaines, 1994) and the exchangeable cations of the low-CEC soils are very susceptible to be leached or drained away in the soil water towards the wetland. Differences in soil nutrient content related to the soil textural class were also observed by Muhammad et al. (2008) in agricultural areas within a soil salinity gradient.

The low fertility of the soil at the Guallar edge could be produced both by the high salinity and/or the high gypsum content (Figure 4A). The low ionic exchange capacity and high calcium content of gypseous soils can produce some limitations for agriculture as those related to soil water-holding capacity, and nutrient and water availability for plants and root growth, as observed in previous studies in Guallar area (Rodríguez-Ochoa and Artieda, 1999; Castañeda and Moret-Fernández, 2013).

5.2. Nutrient availability in soils and the plant nutritional status

The N content found in agricultural soils is within the normal range (Brady and Weil, 2002), between 0.2 and 5.0 g kg⁻¹. The N of soil wheat is 2.9 g kg⁻¹ in Guallar, higher than the mean content (1.5 g kg⁻¹) indicated by Brady and Weil (2002) as representative of agricultural soils. In Gallocanta the mean nitrogen content of agricultural soils is 1.3 g kg⁻¹, similar to that obtained by Zhengchao et al. (2013) in wheat soils of semiarid areas under fertilizer treatments, 1.0 g kg⁻¹ N.

The halophytes soil shows a range of total N content (0.97 – 1.62 g kg⁻¹), slightly lower than the N range obtained in soils of other saline wetlands, 1.6 to 4.1 g kg⁻¹ (Edem and Ndaeyo, 2009). Similarly to the N gradient of Guallar, Abdelly et al. (2011) found a decrease of nitrogen towards the wetland edge, from 2.5 to 1.0 g kg⁻¹ in the halophytes fringe of a Tunisian sabkha.

The C/N ratio of the cereal soils, ranging between 3.7 and 9.2, is lower than the median (C/N = 12) reported by Brady and Weil (2002) for agricultural soils. A low C/N ratio can limit the microbial activity necessary for the release of nutrients for plants growth (Troeh and Thompson, 2005) though it is not the case in the studied soils. The halophytes fringe shows a higher C/N ratio, 9.9 as mean, though lower to the ratio found in other saline wetland soils (Edem and Ndaeyo, 2009).

The minimum available P content of agricultural soils (23.8 mg kg⁻¹) is high according to the mean values reported by Davidescu and Davidescu (1982). Besides, the high available P values obtained are much higher than the critical values above which there is not a significant response of the yield (wheat) to P fertilizer, 16.3 mg kg⁻¹ following Tang et al. (2009) or 7.8 mg kg⁻¹ after Colomb et al. (2007).

Overall, the halophytes area has an available P content (mean = 2.4 mg kg⁻¹) lower than the values reported for other saline wetlands soils (Edem and Ndaeyo, 2009). Exceptionally, two sites, GA19 and GLR7, display higher available P content than the critical values mentioned above for crops. Regarding the mobilization of P downward to the wetland or to low lying areas (Shepherd and Withers, 1999), the P transfer can be done by runoff or by phreatic flows (Haygarth and Jarvi, 1999) and, in our surveyed soils, it is favored by their sandy soil texture. The annual reports from the Ebro Basin Authority (CHE) indicate a seasonal variability of the Total P content in the Gallocanta lake water, from 0.1 mg L⁻¹ to 0.5 mg L⁻¹ (CHE, 2013). This dissolved P can accumulate in the soils of

the wetland margin during flooding periods, as probably occur at the Gallocanta edge, GA19 (Table 2).

Excepting the wheat of Guallar, whose N and P contents are low, the N and P contents in the cereals tissues are within the common ranges established for cereals, N = 2 – 4% and P = 3 – 6‰ (Davidescu and Davidescu, 1982). The mean N and P contents of the halophytes (N = 1.6% and P = 1.2‰) are similar to that obtained in shoots of salt-tolerant species, N = 1.5% and P = 1.4‰ (García and Mendoza, 2008) and in *Salicornia brachiata*, N = 1.5% and P = 1.1%, measured also in April (Rathore et al., 2016).

The mean N/P ratio of the halophytes in Gallocanta (16.2) is above the critical value (14) established by Koerselman and Meuleman (1996) for plant growth, indicating a limited development of halophytes. Although specific nutritional indexes for halophytes have not been found in the literature, the low nutritional indexes measured in Gallocanta (< 80%) correspond and are supported by the phosphorous limitation reported by the high N/P ratio.

The high nutritional indexes obtained for crops of Gallocanta, close to 100%, indicate that there are non-limiting nutrients for plant growth, in agreement with N and P soil contents. The low nutritional indexes of Guallar wheat, < 80%, are related to the low N and P content in the wheat tissues in 2014. The low nutritional indexes values indicate that the cereal growth is limited probably by the soil salinity. However, this year wheat was found in a more advanced development stage. For this reason, the low N and P contents obtained also could be due to the dilution effect produced by a higher amount of the biomass (Justes et al 1994). Moreover, in this saline soil, the weeds (sampled in April) have more N and P in plant and higher nutritional indexes than the wheat.

5.3. Biomass variability

The rainfall amount and its distribution during the growing season is a key factor conditioning the agricultural production in arid and semiarid environments. The local weather conditions in the study sites are associated with the different location in the Ebro basin and their distinct elevation, 1000 m a.s.l and 336 m a.s.l for Gallocanta and Guallar, respectively (Figure 2). The variability obtained for the accumulated rainfall (Figure 6), thermal time and heat use efficiency during the three campaigns (Table 3), must have a direct effect on the high variability of the dry matter yield obtained, both for crops and for halophytes (Table 2). Due to the sampling date delay in 2014 (May, 25-29) the mean dry matter yield this year is less comparable with that obtained in 2013 and 2015.

On a global scale, the accumulated rainfall could be the predominant climate factor controlling the vegetation growth. Wheat yields have been related to seasonal rainfall in nearby areas (McAneney and Arrúe, 1993). However, there is not a clear relationship between the DMY obtained and the accumulated rainfall for crops (Table 3), probably due

to the irregular rainfall distribution during the 3-year survey (Figure 6) and the variability of soil properties distribution.

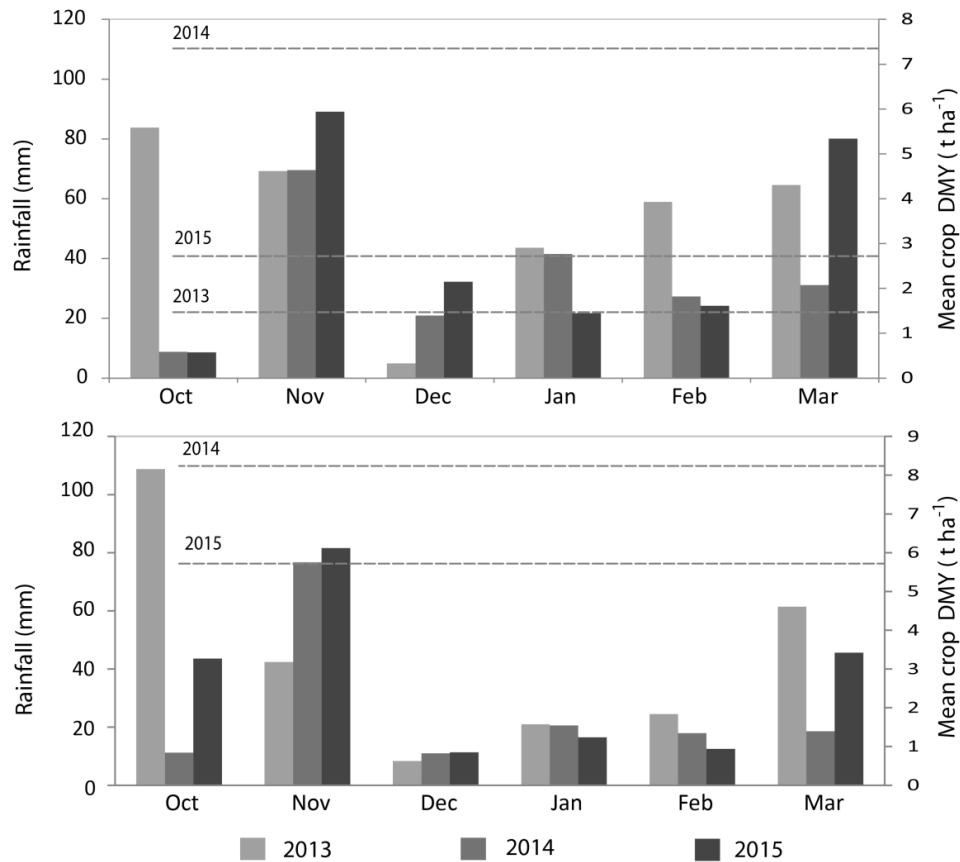


Figure 6. Rainfall from October to March, and the mean crop DMY of each year in A) Gallocanta and B) Guallar.

Soil salinity is also a limiting factor for crop production. A high variability of salinity in the upper soil layer has been observed in the three campaigns (Figure 3). Although barley and wheat are two of the most salt tolerant cereals (Ayers and Westcot, 1976) they can be affected by soil salinity, especially during germination (Munns and Tester, 2008). Soil salinity during the germination stage should not exceed 4 - 5 dS m⁻¹ of ECe (Ayers and Westcot, 1976). In Gallocanta, the salinity of agricultural soils is far below the critical ECe value at which the yield production decreases (6 dS m⁻¹ and 8 dS m⁻¹ for wheat and barley, respectively, Ayers and Westcot (1976)). Nevertheless, even if the upper soil layer is non-saline, the raising of the saline water table and /or the occasional waterlogging can limited the crop development. As reported by farmers, it is common in topographically low areas adjacent to the halophytes fringe, and this can have produced the difference in biomass observed between GA31 (3.0 t ha⁻¹) and GA32 (4.2 t ha⁻¹), located in the same

agricultural plot, though at different topographic position. In Guallar, there is an uncertainty to know the soil salinity due to the gypsum content of GLR6.

The mean halophytes biomass (3.9 t ha^{-1}) is similar to that produced by other halophytes such as *Salicornia brachiata*, in salt marshes in India, with a mean of 4 t ha^{-1} from February to April (Rathore et al., 2016). The exception is the biomass produced at the most strongly saline soil in Guallar, GLR7, with 7.0 t ha^{-1} . This high biomass can be favored by the high cation exchange capacity and the high soil nutrient availability coming from the adjacent agricultural plot. The halophytes biomass has an increased interest due to their economic potential as a crop (Glenn and Brown, 1999) and due to their role as natural purifier in wetlands (Ventura et al., 2015), being of ecological interest in these saline environments (Rathore et al., 2016).

6. Conclusions

There is a high spatial and temporal variability of the fertility status of plant and soil at the interface between rainfed cereals and the adjacent saline areas. This variability is mainly conditioned by the differences in topsoil properties found along the transects oriented perpendicular to the wetland edge. The salinity of the soil and lake water increases with the climatic aridity and, within each wetland it increases towards the lake edge. The size and flooding frequency of the wetlands together with their slope degree create differences on the fertility distribution around the wetlands. Overall, the annual variability of the nutrient content of crops is much higher than that of halophytes.

Both the high salinity and/or the high gypsum content could be responsible of the low fertility values found in some of the soils, and the composition of the overall sand-sized soils limits their capacity to retain nutrients. The nutritional indexes, PNI and NNI, are higher in crops than in halophytes, similarly to the plant nutrient content. Despite the general good soil nutritional status of both wetlands, nutritional indexes of Guallar crops are low, probably associated with the more advanced cereal development stage and the nutrient uptake limitation due to the soil salinity. There is not a clear relationship between the biomass obtained and the accumulated rainfall for crops, and it seems that the soil salinity does not condition the N and P content of plants. The local relative increase in soil P content near the lake edge could be related to the effect of flooding episodes which contribute to the water P accumulation in the soil.

These results are of interest for determining specific management practices aiming to maintain the productivity of agricultural soils that have a high spatial variability, to improve the fertilizer efficiency, and to prevent the pollution of wetlands.



CAPÍTULO 8.

Conclusiones generales y perspectivas futuras

1. Conclusiones

Si bien las conclusiones de cada capítulo de la Tesis quedan reflejadas en su correspondiente apartado, a continuación se presentan las conclusiones generales del estudio así como las posibles líneas futuras de investigación.

El estudio geomorfológico detallado del entorno lagunar en época seca ha permitido identificar formas no reconocibles en campo y procesos ligados a fluctuaciones del nivel de agua de la laguna y condicionantes de la formación de los suelos. El margen sur presenta gran extensión de sedimentos lacustres como depósitos litorales de limos, barreras arenosas, islas y playas, y lagunas costeras. En el margen norte, de mayor pendiente predominan procesos erosivos y formas como microacantilados, terrazas lacustres, y pequeños humedales costeros separados de la laguna por barreras arenosas. La zona palustre de los Lagunazos, al SE de la laguna, presenta la mayor acumulación de sedimentos del entorno lagunar, y se han identificado hasta cinco niveles de terrazas lacustres Holocenas con altitudes desde 1.6 m hasta 4.5 m por encima del fondo actual, habiendo sido inundadas las terrazas bajas en periodos históricos de aguas altas, cuando la laguna superaba un metro de profundidad (años 1970).

Los suelos se han desarrollado indistintamente en sedimentos lacustres, correspondientes a periodos con predominio de sedimentación carbonatada, y sedimentos detríticos, con elevado porcentaje de gravas y gravillas. Los horizontes lacustres son blancos y de textura fina mientras que los detríticos de composición silíceas son rojizos, de textura variable, y con escasos carbonatos, <2%. Entre ambos extremos, los horizontes semilacustres son carbonatados y con materiales detríticos finos. El espesor alcanzado en los materiales lacustres o semilacustres es de 2.5 m. Los colores contrastados de los diferentes horizontes edáficos y la presencia de cambios sedimentarios, truncamientos de la secuencia de horizontes y discontinuidades erosivas, revelan la alternancia de episodios lacustres y detríticos que evidencian la inundación intermitente en zonas desconectadas de la dinámica lagunar actual. Las formas litorales colgadas y el modelo pedogenético observado confirman una tendencia hacia la desecación de la laguna proporcionando evidencias de la existencia de una paleolaguna con una superficie de lámina de agua de al menos 2300 ha, frente a las 500 ha de superficie media de agua actual.

Los suelos estudiados tienen una profundidad de 0.6 a 3.5 m y una secuencia general de horizontes A-B-C. En el fondo lagunar, la franja contigua de la orilla y las terrazas bajas, la secuencia de horizontes predominante es A-C, probablemente por la mayor frecuencia de inundación. Los suelos tienen una composición predominantemente

carbonatada aunque con un contenido muy variable de carbonatos. La diferencia observada entre los suelos de los márgenes norte y sur de la laguna en cuanto al contenido de carbonatos es relativamente pequeña a pesar de la diferente litología, materiales silíceos al norte y materiales carbonatados al sur.

La distribución de la salinidad en el paisaje está relacionada con la salinidad del agua freática, la distancia al fondo lagunar y la topografía. Los suelos del fondo lagunar, de las orillas y de terrazas bajas son muy fuertemente salinos y el agua freática en dichas zonas es hipersalina de tipo clorurado-sulfatado cálcico-magnésico o sódico. En general, la salinidad edáfica es mayor en horizontes profundos debido a la influencia del agua freática. En el fondo inundable de la laguna el horizonte superficial del suelo tiene mayor salinidad debido a la evaporación y concentración de sales, y puede llegar a formarse una costra salina. En zonas topográficamente altas y/o alejadas del fondo lagunar los suelos son no salinos, coincidiendo con agua freática no salina de tipo bicarbonatado cálcico-magnésico.

El estudio de perfiles de suelo a lo largo de toposecuencias ha revelado una gran edafodiversidad y la presencia de ambientes contrastados. En posiciones topográficas elevadas y zonas distantes del fondo lacustre, no inundables (abanicos aluviales) y bajo condiciones xéricas se desarrollan Inceptisoles, con predominio de Typic y Petrocalcic Calcixerept. En cotas bajas (fondo lagunar actual, orillas contiguas y terrazas bajas) donde prevalecen una fuerte salinidad edáfica y condiciones de saturación del suelo se encuentran Aridisoles, generalmente Aquisalids, Typic, Calcic o Gypsic según los horizontes de acumulación. En posiciones intermedias, especialmente en terrazas del margen norte, se desarrollan suelos oscuros ricos en materia orgánica, Mollisoles.

La pedogénesis se caracteriza principalmente por la presencia de acumulaciones, de carbonato en la mayoría de los suelos y de sales solubles y yeso en el fondo lagunar, y de características redoximórficas. Los horizontes cálcicos tienen el máximo desarrollo en suelos de vertientes y abanicos aluviales, donde se tienen horizontes petrocálcicos de entre 0.3 y 1.0 m de espesor. En las terrazas bajas los horizontes cálcicos presentan mínimo desarrollo en forma de nódulos no cementados y bandas de carbonato pulverulento que evidencian la movilización actual de carbonatos relacionada con las fluctuaciones del nivel freático. Los horizontes sálicos y gypsic predominan en los suelos del fondo y de las terrazas más bajas, asociados a un ambiente evaporítico.

El color blanco de la matriz de algunos suelos y las manchas de hierro y manganeso evidencian condiciones de reducción y oxidación asociadas a la saturación de agua en el suelo. Se han identificado en los suelos condiciones de oxidación, reoxidación y reducción, actuales y heredadas. Las características redoximórficas afectan no sólo a suelos de zonas inundables del fondo y orillas de la laguna, sino a suelos en posiciones alejadas del fondo y más elevadas donde prevalece un nivel freático relativamente alto aunque fluctuante. A pesar de la inundación intermitente de la laguna, los suelos del entorno lagunar presentan condiciones de reducción actuales. La

magnitud de movilización de Fe en dichos suelos, determinada mediante la instalación de tubos IRIS como indicadores de condiciones redox en el suelo, está condicionada por las leves diferencias de la topografía de la zona, que influyen en la presencia de agua freática.

El estudio de la fertilidad del ecosistema suelo-planta ha mostrado una gran variabilidad espacial y temporal en la interfase entre la zona de cultivos y las zonas naturales adyacentes de halofitos. Esta variabilidad está condicionada principalmente por las diferencias de las propiedades del suelo a lo largo del transecto orientado de forma perpendicular al borde del humedal. La salinidad del suelo y del agua superficial de los dos humedales estudiados aumenta con el grado de aridez climática y, dentro de cada humedal, aumenta hacia el borde del mismo. El tamaño y la frecuencia de las inundaciones junto con la pendiente han creado diferencias en la distribución de la fertilidad alrededor de los humedales. Tanto la alta salinidad del suelo como el alto contenido de yeso y la textura arenosa del suelo podrían ser los responsables de los bajos valores de fertilidad encontrados en algunos de los suelos y su baja capacidad para retener los nutrientes. A pesar del buen estado nutricional general del suelo de ambos humedales, los índices nutricionales de los cultivos de Guallar son bajos (<80%), probablemente asociados a una limitación de absorción de nutrientes debido a la salinidad del suelo y al estado de desarrollo del cultivo. El relativo aumento del contenido de P del suelo que se da de forma local cerca del borde del humedal en Gallocanta podría estar relacionado con episodios de inundación que contribuyen a la acumulación del P del agua en el suelo.

Esta Tesis aporta información sobre los suelos agrícolas y de hábitats naturales en el entorno de la Laguna de Gallocanta, necesario para conciliar la conservación del humedal con el uso agrícola de su entorno. La caracterización de los suelos ligada a las características geomorfológicas del entorno lagunar es fundamental para interpretar el funcionamiento actual y pasado del sistema lagunar y la distribución y variabilidad de sus hábitats. La fertilidad del ecosistema suelo-planta en cultivos y praderas naturales, y el estado de reducción del suelo ligado a las fluctuaciones hídricas de la laguna, son aspectos a tener en cuenta para conciliar el uso agrícola y la conservación de los hábitats naturales.

2. Perspectivas futuras

El desarrollo de la Tesis ha permitido avanzar en nuevas áreas de investigación con perspectivas futuras en el estudio de la génesis de suelos del entorno lagunar. Una de ellas ya iniciada es la datación de muestras de suelo de unidades geomorfológicas lacustres para reconstruir la ocurrencia de episodios lacustres y detríticos y asociarlos a la formación de diferentes niveles de terrazas lacustres.

En relación a los episodios de inundación y sequía, otra línea de investigación que queda abierta es la interpretación del modelo pedogénico propuesto, a partir del estudio de los colores diferenciados de la matriz de los horizontes detríticos y lagunares, y la distribución del tamaño de partícula en relación a la posición geomórfica de los suelos. Dentro de esta interpretación convendría determinar la composición mineralógica de las arcillas para conocer la procedencia de los sedimentos y completar así el estudio geomorfológico.

Paralelamente, y dada la importancia de las condiciones de inundación del suelo en su génesis, queda abierta la investigación sobre el conocimiento e interpretación de los procesos y posibles factores responsables de las diferentes condiciones de reducción de los suelos, mediante el estudio de la distribución de las zonas reducidas y reoxidadas de los tubos IRIS y contrastando los resultados con el uso de otros indicadores de reducción en ambientes carbonatados, como los tubos de manganeso. Este estudio se puede ampliar con estudios de otras disciplinas, ya iniciados, para conocer los microorganismos presentes en el suelo en condiciones anaerobias e hipersalinas.

Los resultados de salinidad edáfica, condiciones de reducción y fertilidad del ecosistema suelo-planta podrán ser empleados como base para relacionarlos con la distribución de especies y comunidades vegetales en los diversos ambientes asociados a condiciones hídricas fluctuantes en el entorno lagunar y poder así cartografiar la distribución de diferentes hábitats.



BIBLIOGRAFÍA

- Abu, G.S., Kempe, S., 2009. Geomorphology of Lake Lisan terraces along the eastern coast of the Dead Sea, Jordan. *Geomorphology* 108, 246–263.
- Abdelly, C., Debez, A., Smaoui, A., Grignon, C., 2011. Halophyte-fodder species association may improve nutrient availability and biomass production of the sabkha ecosystem. En: Öztürk, M., Böer, B., Barth, H.J., Clüsener-Godt, M., Khan, M.A., Breckle, S.W. (Eds.), *Sabkha Ecosystems, Tasks for Vegetation Science*. Springer. Netherlands, 85-94.
- Abe, S.S., Oyediran, G.O., Masunaga, T., Yamamoto, S., Honna, T., Wakatsuki, T., 2009. Soil Development and Fertility Characteristics of Inland Valleys in the Rain Forest Zone of Nigeria: Mineralogical Composition and Particle-Size Distribution. *Pedosphere* 19, 505-514.
- Abuodha, J.O.Z., 2004. Geomorphological evolution of the southern coastal zone of Kenya. *J. Afr. Earth. Sci.* 39, 517–525 (Key Points on African Geology)
- Adhikari, K., Hartemink, A.E., 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma* 262, 101–111.
- Ahn, Y.S., Mizugaki, S., Nakamura, F., 2006. Historical change in lake sedimentation in Lake Takkobu, Kushiro Mire, northern Japan over the last 300 years. *Geomorphology* 78, 321–334.
- Aliat, T., Kaabeche, M., Khomri, H., Nouri, L., Neffar, S., Chenchouni, H., 2016. A pedological characterisation of some inland wetlands and Ramsar sites in Algeria: Soil physicochemical properties of some Algerian wetlands. *Land Degrad. Dev.* 27, 693–705.
- AlShuaibi, A.A., Khalaf, F.I., 2011. Development and lithogenesis of the palustrine and calcrete deposits of the Dibdibba Alluvial Fan, Kuwait. *J. Asian Earth Sci.* 42, 423–439.
- Álvarez-Rogel, J., Carrasco, L., Marín, C.M., Martínez-Sánchez, J.J., 2007. Soils of a dune coastal salt marsh system in relation to groundwater level, micro-topography and vegetation under a semiarid Mediterranean climate in SE Spain. *Catena* 69, 111–121.
- Álvarez-Solís, J.D., Rosset, P.M., Díaz-Hernández, B.M., Plascencia-Vargas, H., Rice, R.A., 2007. Soil fertility differences across a land-use intensification gradient in the highlands of Chiapas, Mexico. *Biol. Fert. Soils* 43, 379-386.
- APHA, 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17th ed. American Public Health Association, Washington D.C. 1. (268 pp).
- Aranzadi, E., 1980. Estudios de impactos ambientales sobre la laguna de Gallocanta por la acción del desarrollo agrario. Consultante: Proyex S.A., Zaragoza. (184 pp. + maps).
- Artieda, O., Herrero, J., Drohan, P.J., 2006. A refinement of the differential water loss method for gypsum determination in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1932–1935.
- Ascaso A., Casals M., 1985. Aproximación al conocimiento climático de la cuenca endorreica de Gallocanta. En A. Blanco de Pablo (Ed.). *Avances sobre la*

- Investigación en Bioclimatología: 9-19. Centro de Edafología y Biología Aplicada, CSIC. Ediciones Universidad de Salamanca. Salamanca. España.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1976. Water quality for agriculture. FAO. Rome, Italy.
- Bartlett, R.J., James, B.R., 1995. System for categorizing soil redox status by chemical field testing. *Geoderma*, 68, 211–218.
- Beklioglu, M., Romo, S., Kagalou, I.; Quintana, X., Bécares, E., 2007. State of the art in the functioning of shallow Mediterranean lakes. *Hydrobiologia* 584, 317–326.
- Belachew, T., Abera, Y., 2010. Assessment of soil fertility status with depth in wheat growing highlands of Southeast Ethiopia. *World J. Agric. Sci.* 6, 525-531.
- Bennett, S.J., Barrett-Lennard, E.G., Colmer, T.D., 2009. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: A review. *Agr. Ecosyst. Environ.* 129, 349-360.
- Biggs, A.J.W, Bryant, K., Watling, K.M., 2010. A soil chemistry and morphology transects to assist wetland delineation in four semi-arid saline lakes, south-western Queensland. *Aust. J. Soil. Res.* 48, 208–220.
- Birkeland, P.W., 1999. *Soils and Geomorphology*. Third ed. Oxford University Press, New York, USA. (430 pp).
- Blair, T.C., 1999. Sedimentology of gravelly Lake Lahontan highstand shoreline deposits, Churchill Butte, Nevada, USA. *Sediment. Geol.* 123, 199–218.
- Blum, W.E.H., 2002. Environmental protection through sustainable soil management, a Holistic Approach. En: Pagliai, M., Jones, R. (Eds.), *Sustainable Land Management Environmental Protection*. *Adv. Geoecology* 35, 1–8.
- Boettinger, J.L., 1977. Aquisalids (Salorthids) and other wet saline and alkaline soils: problems identifying aquic conditions and hydric soils. In: Vepraskas, M.J., Sprecher, S.W.(Eds.), *Aquic conditions and hydric soils: the problem soils*. SSSA Special Publication No. 50. SSSA (Soil Science Society of America, Inc.), Wisconsin, pp 79–98.
- Boettinger, J.L., Richardson, J.L., 2001. Saline and wet soils of wetlands in dry climates. In: Richardson, J.L., Vepraskas, M.J. (Eds.), *Wetlands Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification*. CRC Press, Florida, US, pp. 383–390.
- Bowman, D., 1971. Geomorphology of the shore terraces of the Late Pleistocene Lisan Lake (Israel). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol* 9, 183–209.
- Brady, N. C., Weil, R. R., 2002. *The Nature and Properties of Soils*, 13th Edition. Prentice Hall, 960 p.
- Brower, J., Fitzpatrick, R.W., 2002. Restricting layers, flow paths and correlation between duration of soil saturation and soil morphological features along a hillslope with an altered soil water regime in western Victoria. *Aust. J. Soil Res.* 40, 927–946.

- Brown, D.J., McSweeney, K., Helme, P.A., 2004. Statistical, geochemical, and morphological analyses of stone line formation in Uganda. *Geomorphology* 62, 217–237.
- Budja, M., Mlekuž, D., 2010. Lake or floodplain? Mid-Holocene settlement patterns and the landscape dynamic of the Ižica floodplain (Ljubljana Marshes, Slovenia). *The Holocene* 20, 1269–1275.
- Buri, M.M., Ishida, F., Kubota, D., Masunaga, T., Wakatsuki, T., 1999. Soils of flood plains of West Africa: General fertility status. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45, 37–50.
- Burjachs, F., Rodó, X., Comín, F.A., 1996. Gallocanta: ejemplo de secuencia palinológica en una laguna efímera. En: Ruiz Zapata, B. (Eds.), *Estudios Palinológicos*. University of Alcalá, Alcalá de Henares, Spain, pp. 25–29.
- Burrough, S.L., Thomas, D.S.G., 2009. Geomorphological contributions to palaeolimnology on the African continent. *Geomorphology* 103, 285–298.
- Calvo, J., González, J.M., González, J., Villena, J., 1978. Primeros datos sobre la sedimentación de dolomía en la laguna de Gallocanta (provincias de Zaragoza y Teruel). *Tecniterrae* 21, 6–15.
- Camacho, A., 2008. La gestión de los humedales en la política de aguas en España. En: del Moral, L., Hernández, N. (Eds.), *Panel científico-técnico de seguimiento de la política del agua*. Fundación Nueva Cultura del Agua y Ministerio de Medio Ambiente. Universidad de Sevilla, España, 63–97.
- Cameron, F.J. Jones, M.V., Edwards, C., 1984. Effects of salinity on bacterial iron oxidation. *Curr Microbiol.* 10, 353–356.
- Canadian Soil Classification Working Group. 1998. The Canadian system of soil classification, 3rd ed. Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646, (187 pp).
- Casado, S., Montes, C., 1995. *Guía de los lagos y humedales de España*. Madrid. España. (255 pp).
- Castañeda, C. 2002. El agua de las saladas de Monegros sur estudiada con datos de campo y de satélite. Consejo de Protección de la Naturaleza en Aragón, Zaragoza, (158 pp). ISBN: 84-7753-919-7. URL: <http://hdl.handle.net/10532/3366>.
- Castañeda, C., Herrero, J., 2008. Assessing the degradation of saline wetlands in an arid agricultural region in Spain. *Catena*, 72, 205–213.
- Castañeda, C., Herrero, J., 2009a. Application of Landsat and ERS imagery to the study of saline wetlands in semi-arid agricultural areas of NE Spain. En: Metternicht, Zinck (Eds.), *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact and Land Management*. CRC Press, Boca Raton, FL. ISBN: 978-1-4200-6502-2, pp. 175–197.
- Castañeda, C., Herrero, J., 2009b. Teledetección de cambios en la Laguna de Gallocanta. En: Casterad, M.A., Castañeda, C. (Eds.), *La Laguna de Gallocanta: medio natural, conservación y teledetección*. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural 7, Madrid, España, pp. 105–128. URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/61407/1/CasteradMA_LagunaGallocanta%28Lib%29_2009.pdf

- Castañeda, C., Latorre-Garcés, B., Herrero Isern, J., 2012. SLICES (Synthetic Layers Integrating Characteristics Enclosed in the Soil) v. 1.0. URL: <http://hdl.handle.net/10261/60892>
- Castañeda, C., Moret-Fernández, D., 2013. Superficial color patches as a visual diagnostic criterion for agricultural management. *Pedosphere* 23, 740-751.
- Castañeda, C., Gracia, F.J., Meyer, A., Romeo, R., 2013a. Coastal landforms and environments in the central sector of Gallocanta saline lake (Iberian Range, Spain). *J. Maps* 9, 584–589.
- Castañeda, C., Herrero, J., Conesa, J.A., 2013b. Distribution, morphology and habitats of saline wetlands: a case study from Monegros, Spain. *Geológica Acta* 11, 371-388.
- Castañeda, C., Gracia, F.J., Luna, E., Rodríguez, R., 2015. Edaphic and geomorphic evidences of water level fluctuations in Gallocanta Lake, NE Spain. *Geoderma* 239–240, 265–279.
- Castenson, K.L., Rabenhorst, M.C., 2006. Indicator of reduction in soil (IRIS): Evaluation of a new approach for assessing reduced conditions in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1222–1226.
- CHE, 2003. Establecimiento de las normas de explotación de la unidad hidrogeológica “Gallocanta” y la delimitación de los perímetros de protección de la laguna. Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe inédito, Zaragoza, España. (394 pp. + mapas).
- CHE, 2013. Diseño y explotación de la red de seguimiento de lagos en la cuenca del Ebro. Informe final 2012-2013. Confederación hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, alimentación y Pesca. 84 pp.
- CHE, 2004. Evolución del contenido de humedad y de la tasa de evaporación en humedales: aplicación a la laguna de Gallocanta. Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe inédito, Zaragoza, España. (93 pp).
- Chen, Y.W., Yongqiang, Z., Li, Bo., Li, S., Aitchison, J.C., 2013. Shrinking lakes in Tibet linked to the weakening Asian monsoon in the past 8.2 ka. *Quat. Res.* 80, 189–198.
- Christie, E. K., Moorby, J., 1975. Physiological responses of semiarid grasses. The influence of phosphorus supply on growth and phosphorus absorption. *Aust. J. Agr. Res.* 26, 423-436.
- Colomb, B., Debaeke, P., Jouany, C., Nolot, J.M., 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Eur. J. Agron.* 26, 154-165.
- Comín, F.A., Alonso, M., López, P., Comelles, M., 1983. Limnology of Gallocanta Lake, Aragón, northeastern Spain. *Hydrobiologia* 105, 207–221.
- Comín, F.A., Julià, R., Comín, M.P., Plana, F., 1990. Hydrogeochemistry of Lake Gallocanta. (Aragón, NE Spain). *Hydrobiologia* 197, 51–66.
- Comín, F.A., Julià, R., Comín, P., 1991. Fluctuations, the key aspect ecological interpretation of ecosystems. *Oecologia Aquat.* 10, 127–135.

- Comín, F.A., Rodó, X., Menéndez, M., 1993. Spatial heterogeneity of macrophytes in Lake Gallocanta (Aragón, NE Spain). En: Hurlbert, S.H. (Eds.), *Saline Lakes V, Developments in Hydrobiology*. Springer Netherlands, pp. 169–178.
- Conesa, J.A., Castañeda, C., Pedrol, J., 2011. Las saladas de Monegros y su entorno: Hábitats y paisaje vegetal. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, Spain. 540 pp. URL: <http://hdl.handle.net/10261/109666>
- Costantini, E.A.C., Pellegrini, S., Bucelli, P., Storchi, P., Vignozzi, N., Barbetti, R., Campagnolo, S., 2009. Relevance of the Lin's and Host hydropedological models to predict grape yield and wine quality. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 13, 1635–1648.
- Couto, W., Sanzonowicz, C., Barcellos, A. de O., 1985. Factors affecting oxidation-reduction processes in an Oxisol with a seasonal water table. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1245–1248.
- Craft, C.B., 2001. Biology of wetland soils. En: *Wetland Soils: J.L. Richardson, M.J. Vepraskas (Eds.), Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification*. pp. 107–135. CRC Press, LLC, Boca Raton, FL.
- Creeper, N., Fitzpatrick, R., Shand, P., 2012. A simplified incubation method using chip-trays as incubation vessels to identify sulphidic materials in acid sulphate soils. *Soil Use Manage.*, 28, 401–408.
- Dantín-Cereceda, J., 1941. La Laguna salada de Gallocanta (Zaragoza). *Estudios Geográficos* 3, 269-301.
- Davidescu, D., Davidescu, V., 1982. Evaluation of fertility by plant and soil analysis. Abacus Press, Kent, UK. 560 pp.
- De Cort, G., Bessems, I., Keppens, E., Mees, F., Cumming, B., Verschuren, D., 2013. Late-Holocene and recent hydroclimatic variability in the central Kenya Rift Valley: the sediment record of hypersaline lakes Bogoria, Nakuru and Elementeita. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 388, 69–80.
- Demas, G.P., Rabenhorst, M.C., Stevenson, J.C., 1996. Subaqueous soils: A pedological approach to the study of shallow water habitats. *Estuar. Coast.* 19, 229–237.
- Demas, G.P., Rabenhorst, M.C., 1999. Subaqueous Soils: Pedogenesis in a Submersed Environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1250–1257.
- Díaz, P., Guerrero, M.C., Alcorlo, P., Baltanás, A., Florín, M., Montes, C., 1998. Anthropogenic perturbations to the trophic structure in a permanent hypersaline shallow lake: La Salada de Chiprana (north-eastern Spain). *International Journal of Salt Lake Research* 7, 187-210.
- Díaz de Arcaya, N., Castañeda C., Herrero J., Losada J.A., 2005. Cartografía de coberturas asociadas a las fluctuaciones de la Laguna de Gallocanta. *Revista de la Asociación Española de Teledetección* 24, 61–65. URL: <http://www.aet.org.es/?q=revista24-11>
- Dorau, K., Mansfeldt, T., 2015. Manganese-oxide-coated redox bars as an indicator of reducing conditions in soils. *J. Environ. Qual.*, 44, 696–703.

- Dorau, K., Eickmeier, M., Mansfeldt, T., 2016. Comparison of manganese and iron oxide-coated redox bars for characterization of the redox status in wetland soils. *Wetlands* 36, 133–141.
- Drake, N., Bristow, C., 2006. Shorelines in the Sahara: geomorphological evidence for an enhanced monsoon from palaeolake Megachad. *The Holocene* 16, 901–911.
- Durand, N., Monger, H.C., Canti, M.G., 2010. Calcium carbonate features. En: Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (Eds.), *Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Elsevier, pp. 149–194.
- Duru, M., Ducrocq, H., 1997. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 47, 59–69.
- Eugster H.P., Hardie L.A., 1978. Saline lakes. En: Lerman A. (Ed.), *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Springer, New York, pp. 237–289.
- Edem, S.O., Ndaeyo, N. U., 2009. Fertility status and management implications of wetlands soils for sustainable crop production in Akwa Ibom State, Nigeria. *Environ. Dev. Sustain* 11, 393–406.
- Evans, D.G., Kendall, C.G.St.C., Skipwith, P., 1964. Origin of the coastal flats, the sabhka of the Trucial coast, Persial Gulf. *Nature* 202, 759–761.
- Faci, J. M., Martínez-Cob, A., 1991. The Reference Evapotranspiration Estimation in Aragón. *Diputación General de Aragón, Zaragoza, Spain*. 115 pp. URL: <http://digital.csic.es/handle/10261/73507>
- Farpoor, M.H., Neyestani, M., Eghbal, M.K., Borujeni, I.E., 2012. Soil-geomorphology relationships in Sirjan playa, south central Iran. *Geomorphology* 138, 223–230.
- Fitter, A.H., Fitter, R.S.R., Harris, I.T.B., Williamson, M.H., 1995. Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Funct. Ecol.* 9, 55–60.
- Flower. R., Foster, I.D.L., 1992. Climatic implications of recent changes in lake level at Lac Azigza (Morocco). *Bulletin de la Société Géologique de France* 163, 91–96.
- Fort, F., Cruz, P., Catrice, O., Delbrut, A., Luzarreta, M., Stroia, C., Jouany, C., 2015. Root functional trait syndromes and plasticity drive the ability of grassland Fabaceae to tolerate water and phosphorus shortage. *Environ. Exp. Bot.* 110, 62–72.
- Franzen, D.W., Nanna, T., Norvell, W.A. 2006. A survey of soil attributes in North Dakota by landscape position. *Agron. J.* 98, 1015–1022.
- Freytet, P., Verrechia, E.P., 2002. Lacustrine and palustrine carbonate petrography: an overview. *J. Paleolimnol.*, 27, 221–237.
- Gaines, T.P., Gaines, S.T., 1994. Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. *Commun. Soil Sci. Plan. Anal.*, 25, 2561–2570.
- Galicia, D., Vazquez-Dodero, I., Hervás, J., Melado, F., Martínez, R., 2015. Caracterización ecológica de la Red Natura 2000 en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. (264 pp).

- García, I.V., Mendoza, R.E., 2008. Relationships among soil properties, plant nutrition and arbuscular mycorrhizal fungi-plant symbioses in a temperate grassland along hydrologic, saline and sodic gradients. *FEMS. Microb. Ecol.* 63, 359-371.
- García-Giménez, R., González-Cascón, R., Vigil R., Jiménez-Ballesta, R., 2015. Aeolian sands and soils of a Wetland Biosphere Reserve: The Tablas de Daimiel. *Eur. J. Soil Sci.* 5, 259–275.
- García-Vera, M.A., Martínez-Cob, A., 2004. Evolución del contenido de humedad y de la tasa de evaporación en humedales: aplicación a la Laguna de Gallocanta. 2004-PH-14-I, Zaragoza, España. URL: <http://hdl.handle.net/10261/2976>
- García-Vera, M.A., San Román Saldaña, J., Blasco Herguedas, O., Coloma López, P., 2009. Hidrogeología de la Laguna de Gallocanta e implicaciones ambientales. En: Casterad, M.A., Castañeda, C. (Eds.), *La Laguna de Gallocanta: Medio natural, conservación y teledetección. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 7, pp. 79-104. URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/61407/1/CasteradMA_LagunaGallocanta%28Lib%29_2009.pdf
- Garrels, R.M., Christ, C.L., 1965. *Solutions, Minerals, and Equilibria*. Harper and Row, New York, USA. (464 pp.)
- Garrido, S., 1994. Interpretación de análisis de suelos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. Spain. (40 pp.)
- Ghienne, J. F., Shcuster, M., Bernard, A., Durringer, P., Brunet, M., 2002. The Holocene giant Lake Chad revealed by digital elevation models. *Quat. Int.* 87, 81–85.
- Ghinassi, M., D'Oriano, F., Benvenuti, M., Awramik, S., Bartolini, C., Fedi, M., Ferrari, G., Papini, M., Sagri, M., Talbot, M., 2012. Shoreline fluctuations of Lake Hayk (northern Ethiopia) during the last 3500 years: geomorphological, sedimentary, and isotope records. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.* 365–366, 209–226.
- Girijesh, G.K., Kumara, A.S., Sridhara, S., Dinesh, M., Vageesh, T.S, Nataraju, S.P., 2011. Heat use efficiency and helio-thermal units for maize genotypes as influenced by dates of sowing under southern transitional zone of Karnataka state. *Int. J. Sci. and Nature* 2, 529-533.
- Glenn, E.P., Brown, J.J., 1999. Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Crc. Cr. Rev. Plant Sci.* 18, 227-255.
- Gómez, D., Monserrat, G., Ferrer, J., 1983. Aportación al estudio de la flora y vegetación en la cuenca endorreica de Gallocanta. En: Aranzadi, E., Guiral, J.J. (Eds.), *Estudio de la Biocenosis de la Laguna de Gallocanta y su cuenca*. MOPU, Madrid, España. (982 pp).
- González-López, J. M., González Martínez, J., Fernández-Nieto, C., Pardo, G., 1983. Sedimentación carbonatada en la Laguna de Gallocanta (Provincias de Zaragoza y Teruel). *Boletín Sociedad Española de Mineralogía* 6, 81–88.
- Gough, M.W., Marrs, R.H., 1990. A comparison of soil fertility between semi-natural and agricultural plant communities: implications for the creation of species rich grassland on abandoned agricultural land. *Biol. Conserv.* 51, 83-96.

- Gouramanis, C., Wilkins, D., De Deckker, P., 2010. 6000 years of environmental changes recorded in Blue Lake, South Australia, based on ostracod ecology and valve chemistry. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 297, 223–237.
- Gracia, F.J., 1990. Geomorfología de la región de Gallocanta (Cordillera Ibérica central) (PhD Thesis) University of Zaragoza, Zaragoza, Spain, (691 pp).
- Gracia, F.J., Santos, J.A., 1992. Caracterización sedimentológica y modelo deposicional costero de una terraza lacustre pleistocena en la Laguna de Gallocanta (Provincia de Zaragoza). *Simposium sobre Sedimentación Lacustre*, Salamanca, Spain. III Congreso Geológico de España 1, 98–107.
- Gracia, F.J., 1995. Shoreline forms and deposits in Gallocanta Lake (NE Spain). *Geomorphology* 11, 323–335.
- Gracia, F.J., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., 2002. Origin and evolution of the Gallocanta polje (Iberian Range, NE Spain). *Z. Geomorphol. N.F.* 46, 245–262.
- Gracia, F.J., 2009. Geología y Geomorfología de la Laguna de Gallocanta. In Casterad, M.A., Castañeda, C. (Eds.), *La Laguna de Gallocanta, Medio natural, conservación y teledetección. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 7, pp. 59–76. URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/61407/1/CasteradMA_LagunaGallocanta%28Lib%29_2009.pdf
- Gracia, F.J., 2014. Gallocanta Saline Lake, Iberian Chain. In: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (Eds.), *Landscapes and Landforms of Spain. World Geomorphological Landscapes*. Springer Science + Business Media, Dordrecht, Holland, pp. 137–144.
- Grealish, G., Fitzpatrick, R., Shand, P., 2010. Acid sulphate soil toposequences in wetlands of the Lower River Murray. In: *Soil Solutions for a Changing World* (eds R.J. Giles, N. Prakongkep), *Proceedings of the 19th Congress of Soil Science*, pp 17–20, 1–6 August, Brisbane, Australia. Published on DVD.
- Grieve, C., Grattan, S., Maas, E., 2011. *Plant Salt Tolerance. Agricultural Salinity Assessment and Management*. 2nd edition, pp. 405–459.
- Guilloré, P., 1985. *Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces*, 3th ed. Institut National Agronomique, Paris-Grignon. (En Francés)
- Guiral, J.J. 1983. Introducción al conocimiento del clima de la cuenca de la laguna de Gallocanta. En *Proyex, S.A. (Eds.), Estudio de la biocenosis de la laguna de Gallocanta y su cuenca*. CEOTMA. Minist. Obras Públicas Urbanismo, Madrid: pp. 119–138.
- Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., Gracia, F.J., McCalpin, J.P., Lucha, P., Guerrero, J., 2008. Plio-Quaternary extensional seismotectonics and drainage network development in the central sector of the Iberian Chain (NE Spain). *Geomorphology* 102, 21–42.
- Gutiérrez, F., Valero-Garcés, B., Desir, G., González-Sampériz, P., Gutiérrez, M., Linares, R., Zarroca, M., Moreno, A., Guerrero, J., Roqué, C., Arnold, L.J., Demuro, M., 2013. Late Holocene evolution of playa lakes in the Central Ebro

- depression based on geophysical surveys and morpho-stratigraphic analysis of lacustrine terraces. *Geomorphology* 196, 177–197.
- Guzys, S., Miseviciene, S., 2015. Nitrogen migration in crop rotations differing in fertilisation. *Span. J. Agric. Res.* 13, 13 pp.
- Haygarth, P.M., Jarvis, S. C., 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Adv. Agron.* 66, 195-249.
- Heanes, D.L., 1984. Determination of total organic-C in soils by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Commun. Soil Sci. Plan.* 15, 1191–1213.
- Hernández, A., Olivé, A., Pardo, G., Villena, J., Moissenet, E., 1980. Mapa geológico de la Hoja nº 491 (Calamocha). Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.
- Hernández-Pacheco, F., Aranegui, P., 1926. La laguna de Gallocanta y la geología de sus alrededores. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 26, 419–429. URL: <http://bibdigital.rjb.csic.es/ing/Libro.php?Libro=1239>
- Herrero, J., Snyder, R.L. 1997. Aridity and irrigation in Aragón, Spain. *J. Arid Environ.* 35, 55-547.
- Herrero, J., Castañeda, C., 2009. Delineation and functional status monitoring in small saline wetlands of NE Spain. *J. Environ. Manage.* 90, 2212-2218.
- Hoffmann, N., Reicherter, K., Grützner, C., Hürtgen, J., Rudersdorf, A., Viehberg, F.A., Wessels, M., 2012. Quaternary coastline evolution of Lake Ohrid (Macedonia/Albania). *Cent. Eur. J. Geosci.* 4, 94–110.
- Hunt, C.B., Washburn, A.L., 1966. Patterned ground. *USGS Prof. Papers* 494–B, pp. 104–133.
- Hurt, G.W., Vasilas L.M., 2006. Field indicators of hydric soils in the United States (Version 6.0), USDA, NRCS, Fort Worth, TEXAS, USA. URL: http://www.lienvirothon.org/pdf/Soils/FieldIndicators_v6_0.pdf
- Isla, F.I., Bassani, S., 1992. Evolución de costas y playas en lagos artificiales: Mari Menuco y Los Barreales, Neuquen, Argentina. *VIII Congreso Latinoamericano de Geología*, Salamanca, vol. 4, pp. 404–408.
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. *World Soil Resources Report No 106*, FAO, Rome, Italy.
- Jackson, J.A., 1997. Glossary of Geology, 4th ed. American Geological Institute, (769 pp).
- Jenkinson, B.J., Franzmeier, D.P., 2006. Development and evaluation of Iron-coated tubes that indicate reduction in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 183–191.
- Jiménez, R., 2014. Los suelos del Parque Natural de las Tablas de Daimiel. Universidad Autónoma de Madrid. España. (194 pp).

- Jiménez-Castañeda, A., 2014. Un sistema automático de tratamiento de Imágenes landsat en entorno sig para gestión de espacios protegidos: aplicación al ámbito de la Laguna de Gallocanta. (Master Thesis). Universidad de Zaragoza, España. (69 pp).
- Jiménez-Castañeda, A., Luna, E., Castañeda, C., 2015. Integración de datos territoriales de la Reserva Natural de La Laguna de Gallocanta como base para su gestión. XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles, "Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación", Zaragoza, 28, 29 y 30 de octubre de 2015. pp 36-39. URL: <http://digital.csic.es/handle/10261/128011>
- Johnson, L.A., Haukos, D.A, Smith, L.M., McMurry, S.T., 2011. Loss of Playa wetlands caused by reclassification and remapping of hydric soils on the southern high plains. *Wetlands* 31, 483–492.
- Jones, K.L., Poole, G.C., O'Daniel, S.J., Mertes, L.A.K., Stanford, J.A., 2008. Surface hydrology of low-relief landscapes: assessing surface water flow impedance using LiDAR-derived digital elevation models. *Remote Sens. Environ.* 112, 4148–4158.
- Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., Gardi, C., Hervás, J., Hiederer, R., Jeffery, S., Montanarella, L., Penizek, V., Tóth, G., Eeckhaut, M.V.D., Liedekerke, M.V., Verheijen, F., Yigini, Y., 2012. The state of soil in Europe - A contribution of the JRC to the European Environment Agency's environment state and outlook report – SOER 2010. No. EUR 25186.
- Jouany, C., Cruz, P., Petibon, P., Duru, M., 2004. Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover. *Eur. J. Agron.* 21, 273-285.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelier-Huche, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot* 74, 397–407.
- Kim, C.H., Park, J.W., Lee, M.H., Park, C.H., 2013. Detailed bathymetry and submarine terraces in the coastal area of the Dokdo volcano in the Ulleung Basin, the East Sea (Sea of Japan). *J. Coast. Res.* 65, 523–528 (Spec. Issue).
- King, G.M., Garey, M.A., 1999. Ferric iron reduction by bacteria associated with the roots of freshwater and marine macrophytes. *App. Environ. Microb.* 65, 4393–4398.
- Koerselman, W., Meuleman, A. F. M., 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J. Appl Ecol* 6, 1441-1450.
- Kolka, R., Thompson, J., 2007. Wetland geomorphology, soils and formative processes. In: Batzer, D. P., Sharitz, R.R. (Eds.), *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*. University of California Press. Berkeley, CA, USA. (581 pp).
- Komatsu, T., Watanabe, T., Hirakawa, K., 2010. A framework for Late Quaternary lake-level fluctuations in Lake Karakul, eastern Pamir, focusing on lake-glacier landform interaction. *Geomorphology* 119, 198–211.
- Landmann, G., Reimer, A., 1996. Climatically induced lake level changes at Lake Van, Turkey, during the Pleistocene/Holocene Transition. *Global Biogeochem. Cy.* 10, 797–808.
- Lees, B.G., 1989. Lake segmentation and lunette initiation. *Z. Geomorphol.* 33, 475–484.

- Lees, B.G., Cook, P.G., 1991. A conceptual model of lake barrier and compound lunette formation. *Palaeogeogr. Palaeocl.* 84, 271–284.
- Lemaire, G., Gastal, F., Salette, J., 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of sward by reference to potential yield and optimum N content. XVI Int. Grassland Cong. Nice, France, 179-180.
- Leránoz, B., González, M., 2009. Historia, evolución y gestión de la Reserva Natural Dirigida de la Laguna de Gallocanta. En: Casterad, M.A., Castañeda, C. (Eds.), *La Laguna de Gallocanta, Medio natural, conservación y teledetección. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 7, pp. 7-30. URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/61407/1/CasteradMA_LagunaGallocanta%28Lib%29_2009.pdf
- Li, F., 2001. *Chinese Soil Taxonomy*. Science Press, Beijing-New York. (203 pp).
- Lichvar, R., Brostoff, W., Sprecher, S. 2006. Surficial features associated with ponded water on playas of the arid southwestern United States: indicators for delineating regulated areas under the Clean Water Act. *Wetlands* 26, 385–399.
- Lindbo, D.L., Stolt, M.H., Vepraskas, M.J., 2010. Redoximorphic features. In: *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Their Relevance for Pedogenic Studies and Classifications* (eds G. Stoops, V. Marcelino, F. Mees), pp. 129–147, Elsevier, Oxford, UK.
- Liso, M., Ascaso, A., 1969. Introducción al estudio de la evapotranspiración y clasificación climática de la cuenca del Ebro. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei, Zaragoza, Spain*, 10 (523 pp). URL: <http://digital.csic.es/handle/10261/5565>
- López-Geta, J.A., Fornés, M.A., 2009. La geología e hidrogeología en la investigación y gestión de los humedales. IGME. Madrid. España. *Hidrogeología y aguas subterráneas* 28, (306 pp).
- Luna, E., Latorre, B., Castañeda, C., 2014. Rainfall and the presence of water in Gallocanta Lake. *Proceedings of the IX European Wetland Congress, Wetlands Biodiversity and Services: Tools for Socio-Ecological Development*, Huesca, Spain, 164 pp. URL: <http://digital.csic.es/handle/10261/117417>
- Luna, E., Castañeda, C., Gracia, F.J., Rodríguez-Ochoa, R., 2016. Late Quaternary pedogenesis of lacustrine terraces in Gallocanta Lake, NE Spain. *Catena*, 147, 372–385.
- Luzón, A., Pérez, A., Mayayo, M.J., Soria, A.R., Goñi, M.F.S., Roc, A.C., 2007a. Holocene environmental changes in the Gallocanta lacustrine basin, Iberian Range, NE Spain. *The Holocene* 17, 649–663.
- Luzón, A., Pérez, A., Sánchez, J.A., Soria, A.R., Mayayo, M.J., 2007b. Evolution from a freshwater to saline lake: a climatic or hydrogeological change? The case of Gallocanta Lake (northeast Spain). *Hydrogeological Process*. 21, 461–469.
- Machette, M.N., 1985. Calcic soils of the southwestern United States. En: Weide, D.L. (Eds.), *Soils and Quaternary geomorphology of the southwestern United States*. Geological Society of America Special Paper 203.

- MAPA, 1994. Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. España. (662 pp).
- Martínez-Cob, A., Zapata, N., Sánchez, I., 2010. Viento y riego. La variabilidad del viento en Aragón y su influencia en el riego por aspersión. Institución Fernando El Católico. Zaragoza, España. (200 pp). URL: <http://digital.csic.es/handle/10261/23680>
- Mason, I.M., Guzkowska, M.A.J., Rapley, C.G., Street-Perrott, F.A., 1994. The response of lake levels and areas to climatic change. *Clim. Chang.* 27, 161–197.
- Matsu'ura, T., 2015. Late Quaternary Uplift Rate Inferred from Marine Terraces, Muroto Peninsula, Southwest Japan: Forearc Deformation in an Oblique Subduction Zone. *Geomorphology* 234, 133–150.
- Mayayo, M. J., Luzón, A., Soria, A.R., Roc, A.C., Sánchez-Goñi, M.F., Sánchez, J.A., Pérez, A., 2003. Sedimentological evolution of the Holocene Gallocanta Lake, NE Spain. En: B.L. Valero-Garcés (Eds.), *Limnogeology in Spain: a tribute to Kerry Kelts*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Spain, pp. 359–384.
- McAneney, K. J., Arrúe, J. L. 1993. A wheat-fallow rotation in northeastern Spain: Water balance-yield considerations. *Agronomie* 13, 481-490.
- McGlue, M.M., Cohen, A.S., Ellis, G.S., Kowler, A.L., 2013. Late Quaternary stratigraphy, sedimentology and geochemistry of an underfilled lake basin in the Puna plateau (northwest Argentina). *Basin Res.* 25, 638-658.
- Mees, F., Castañeda, C., Herrero, J., van Ranst, E. 2012. The nature and significance of variations in gypsum crystal morphology in dry lake basins. *J. Sediment. Res.* 82, 37-52.
- Merlín-Uribe, Y., Contreras-Hernández, A., Astier-Calderón, M., Jensend, O.P., Zaragoza, R., Zambrano, L., 2011. Urban expansion into a protected natural area in Mexico City: alternative management scenarios. *J. Environ. Plan. Manag.* 56, 398-411.
- Mitsch, W.J, Gosselink, J.G., 2015. *Wetlands*. 5th ed. John Wiley and Sons. New Jersey. USA. (721 pp).
- Moreno, J.C., 2013. *Puccinellia pungens*. The IUCN Red List of Threatened Species. Versión 2014.3. URL: <http://www.iucnredlist.org/details/161914/0>
- Moreno-Ramón, H., Marqués-Mateu, A., Ibáñez-Asensio, S., Gisbert-Blanquer, J.M., 2015. Wetland soils under rice management and seawater intrusion: Characterization and classification. *Eur. J. Soil Sci* 5, 111–129.
- Muhammad, S., Müller, T., Joergensen, R.G., 2008. Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab. *J. Arid Environ.* 72, 448-457.
- Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev. Plant Biol.* 59, 651-81.

- Neal, J.T., 1972. Playa surfaces features as indicators of environment. Playa-lake Symp. Proc., ICSCALS Publ. 4. Texas Tech University. Lubbock, Texas, pp. 107–132.
- Niqueux, M., Arnaud, R., 1967. Recherche d'une relation entre précocité d'épiaison et températures pour quelques variétés de graminées fourragères observées en France. *Ann. Physiol. Vég.*, 1, 29-64.
- Nogués, J., Robinson, D.A., Herrero, J., 2006. Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 2075–2085.
- Ocakoglu, F., Kir, O., Yilmaz, I.O., Acikalin, S., Erayik, C., Tunoglu, C., Leroy, S.A.G., 2013. Early to Mid-Holocene lake level and temperature records from the terraces of Lake Sünnet in NW Turkey. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 369, 175–184.
- Olivé, A., Hernández, A., Portero, J.M., Moissenet, E., Gutiérrez, M., Aguilar, M.J., Leal, M.C., 1980. Memoria del Mapa geológico de la Hoja nº 491 (Calamocha). Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.
- Olsen, S., Cole, C., Watanabe, F., Dean, L., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular Nr 939, US Gov. Print. Office, Washington, D.C. USA.
- Otero, X.L., Macías, F., 2001. Caracterización y clasificación de suelos de las Marismas de la Ría de Ortigueira en relación con su posición fisiográfica y vegetación (Galicia–NO de la Península ibérica). *Edafología* 8, 37–61.
- Parida, A.K., Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 60, 324-349.
- Pérez, A., Roc, A.C., 1999. Los sedimentos de la laguna de Gallocanta y su comparación con las calizas de la Muela de Zaragoza. *Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Serie Investigación.* 14 (114 pp).
- Pérez, M. E., García, M. P., 2000. Estudio microclimático de la laguna de Gallocanta. En Aguado, I., Gómez, M. (Eds.), *Tecnología Geográficas para el Desarrollo Sostenible*, IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, S.I.G. y Teledetección, Universidad de Alcalá, septiembre de 2000, 102-114.
- Pérez, A., Luzón, A., Roc, A.C., Soria, A.R., Mayayo, M.J., Sánchez, J.A., 2002. Sedimentary facies distribution and genesis of a recent carbonate-rich saline lake: Gallocanta Lake, Iberian Chain, NE Spain. *Sediment. Geol.* 148, 185–202.
- Pérez, M. E., García, M. P., Sanz, J.J., 2009. Características hídricas y microclima de la Laguna de Gallocanta. En: Casterad, M.A., Castañeda, C. (Eds.), *La Laguna de Gallocanta, Medio natural, conservación y teledetección. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 7, pp. 129-146. URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/61407/1/CasteradMA_LagunaGallocanta%28Lib%29_2009.pdf

- Pérez-Bujarrabal, E., 2014. Recordando Gallocanta, 1972–1984. *Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Biol.* 108, 107–123. URL: <http://historia.bio.ucm.es/rsehn/index.php?d=publicaciones&num=34&w=242&ft=1>
- Platt, N.H., 1989. Lacustrine carbonates and pedogenesis: sedimentology and origin of palustrine deposits from the Early Cretaceous Rupelo Formation, W Cameros Basin, N Spain. *Sedimentology* 36, 665–684.
- Plotnikov, I.S., Aladin, N.V., 2011. An overview of hybrid marine and lacustrine seas and saline lakes of the world. *Lakes Reserv. Res. Manag.* 16, 97–108.
- Rabenhorst, M.C., Burch, S.N., 2006. Synthetic iron oxides as an indicator of reduction in soils (IRIS). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1227–1236.
- Rabenhorst, M.C., 2008. Protocol for using and interpreting IRIS tubes. *Soil Survey Horizons*, 49, 74–77.
- Rabenhorst, M.C., Bourgault, R.R., James, B.R., 2008. Iron oxyhydroxide reduction in simulated wetland soils: Effects of mineralogical composition of IRIS paints. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1838–1842.
- Rabenhorst, M.C., Megonigal, J.P., Keller, J., 2010. Synthetic iron oxides for documenting sulphide in marsh pore water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1383–1388.
- Rabenhorst, M.C., 2012. Simple and reliable approach for quantifying IRIS tube data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 307–308.
- Ramsar Convention Secretariat, 2010. Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands, 4th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland (Switzerland) vol. 1, (56 pp).
- Rathore, A.P., Chaudhary, D.R., Jha, B., 2016. Biomass production, nutrient cycling, and carbon fixation by *Salicornia brachiata* Roxb.: A promising halophyte for coastal saline soil rehabilitation. *Int. J. Phytoremediat.* 18, 801–811.
- Renaut, R.W., 1990. Recent carbonate sedimentation and brine evolution in the saline lake basins of the Cariboo Plateau, British Columbia, Canada. *Hydrobiologia* 197, 67–81.
- Richardson, J.L., Arndt, J.L., Montgomery, J.A., 2001. Hydrology of wetland and related soils. In: Richardson, J.L., Vepraskas, M.J. (Eds.), *Wetlands Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification*. CRC Press, Florida, US, pp. 35–84.
- Richardson, J.L., Vepraskas, M.J., 2001. *Wetland soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification*. CRC Press, Boca Raton, Florida (417 pp).
- Roc, A.C., Pérez, A., 2003. Dispositivo sedimentario desarrollado en la Cuenca de Gallocanta a lo largo del Holoceno. *Cordillera Ibérica. Ne España. Geogaceta*, 34, 11–14.
- Rodó, X., 1997. Ecological time scales in an aquatic ecosystem: the Gallocanta Lake (NE Spain) (PhD Thesis). Universidad de Barcelona, Barcelona, España. (409 pp).
- Rodó, X., Giralt, S., Burjachs, F., Comín, F., Tenorio, R.G., Julià, R., 2002. High-resolution saline lake sediments as enhanced tools for relating proxy paleolake records to recent climatic data series. *Sediment. Geol.* 148, 203–220.

- Rodríguez-Ochoa, R., Artieda, O., 1999. Introducción a los suelos de Monegros. En: Melic, A., Blasco-Zumeta, J. (Eds.). *Manifiesto científico por Los Monegros*. Bol. SEA 24, 67-72.
- Romanovsky, V., 2002. Water level variations and water balance of Lake Issyk-Kul. *Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences* 13, 45–57.
- Romeo-Gamarra, R., Castañeda, C., Maestro, M., García-González, M. T., 2011. Rasgos de paisaje y suelos para la gestión ambiental de la laguna de Gallocanta. In: *Proceedings of the “15th International Congress on Project engineering”*, pp 0994–1009.
- Ruhe, R.V., 1959. Stone lines in soils. *Soil Sci.* 84, 223–231.
- Sahrawat, K.L., 2015. Redox Potential and pH as Major Drivers of Fertility in Submerged Rice Soils: A Conceptual Framework for Management. *Commun. Soil Sci. Plan* 46, 1597-1606.
- Scotney, D. M., Dijkhuis, F.J., 1990. Changes in the fertility status of South African soils. *S. Afr. J. of Sci* 86, 395-402.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., Soil Survey Staff., 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. URL: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054184
- Schütt, B., 1998. Reconstruction of Holocene paleoenvironments in the endorheic basin of Laguna de Gallocanta, Central Spain by investigation of mineralogical and geochemical characters from lacustrine sediments. *J. of Paleolimn.* 20, 217–234.
- Seneviratne, G., Kulasooriya, S.A., Rosswall, T., 1994. Sustainment of soil fertility in the traditional rice farming, dry zone, Sri Lanka. *Soil Biol. Biochem.* 26, 681-688.
- Shabanova, N.P., Kolesnikov, A.V., Bykov, A.V., 2015. Morphological and chemical properties of soils on the eastern shore of Lake Bulukhta, northern Caspian region. *Eurasian Soil Sci.* 48, 781–791.
- Sharitz, R., Batzer, D, Pennings, S., 2014. Ecology of freshwater and estuarine wetlands: An introduction, in: Batzer, D., Sharitz, R. (Eds.), *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*, University of California press. Oakland, California, USA. pp. 361.
- Shaw, P.A., Thomas, D.S.G., 1997. Pans, playas and salt lakes, second ed, in: David S.G. Thomas. (EDS.), *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands* (293-318).
- Shepherd, M.A., Withers, P.J., 1999. Applications of poultry litter and triple superphosphate fertilizer to a sandy soil: effects on soil phosphorus status and profile distribution. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 54, 233-242.
- Shuman, B., Bravo, J., Kaye, J., Lynch, J.A., Newby, P., Webb III, T., 2001. Late Quaternary Water-Level Variations and Vegetation History at Crooked Pond, Southeastern Massachusetts. *Quatern. Res.* 56, 401–410.

- Siljeström, P.A., Moreno, A., Garcia, L.V., Clemente, L.E., 1994. Doñana National Park (south-west Spain): geomorphological characterization through a soil-vegetation study. *J. Arid Environ.* 26, 315–323.
- Silvan, N., Vasander, H., Laine, J., 2004. Vegetation is the main factor in nutrient retention in a constructed wetland buffer. *Plant Soil*, 258, 179-187.
- SINEDARES, 1983. Sistema de Información Edafológica y Agronómica de España. Manual para la descripción de suelos en campo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. España. (137 pp).
- Snyder, M., Tallefert, M., Ruppel, C., 2004. Redox zonation at the saline-influenced boundaries of a permeable surficial aquifer: Effects of physical forcing on the biogeochemical cycling of iron and manganese. *Journal of Hydrology*, 296, 164–178.
- Soil Survey Division Staff., 1993. Soil survey manual. Natural Resources Conservation Service, Handbook 18. USDA. Washington, DC. (315 pp).
- Soil Survey Staff (SSS), 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA - Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. USA. (360 pp). URL: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs142p2_053580
- Splinter, D.K., Dahmas, D.E., May, D.W., 2005. Soils and Geomorphology of the Lower Little Cedar River Valley, Northeast Iowa. *Phys. Geogr.* 26, 52–68.
- Stiles, C.A., Dunkinson, E.T., Ping, C.L., Kidd, J., 2010. Initial field installation of manganese indicators of reduction in soils, Brooks Range, AK. *Soil Survey Horizons*, 51, 102–107.
- Stine, S., 1990. Late Holocene fluctuations of Mono Lake, eastern California. *Palaeogeogr. Palaeocl.* 78, 333–381.
- Stolt, M.H., Genthner, M.H., Daniels, W.L., Groover, V.A., 2001. Spatial variability in palustrine wetlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 527-535.
- Stoops, G., 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil. Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. (184 pp).
- Tang, X., Ma, Y., Hao, X., Li, X., Li, J., Huang, S., Yang, X., 2009. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant Soil* 323, 143-151.
- Taubner, H., Roth, B., Tippkotter, R., 2009. Determination of soil texture: comparison of the sedimentation method and the laser–diffraction analysis. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 161–171.
- Ten Brink, P., Russi, D., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Kumar, R., Davidson, N., 2013. La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales. Resumen ejecutivo. Institute for European Environmental Policy (IEEP). pp. 16

- Theau, J. P., Zerourou, A., 2008. Herb'âge, une méthode de calcul des sommes de températures pour la gestion des prairies. En: Outil pour la gestion des prairies permanentes (p. 91-102). Presented at Symposium international INRA-UMR AGIR (Agrosystèmes et développement territorial): Outils pour la gestion des prairies permanentes, Castanet-Tolosan, FRA (2005-07-06 - 2005-07-08). URL: <http://prodinra.inra.fr/record/32664>
- Timms, B.V., 1992. Lake Geomorphology. Gleneagles Publishing, Adelaide, Australia. (195 pp).
- Timms, B.V., 2006. The geomorphology and hydrology of Saline Lakes of the Middle Paroo, Arid-zone, Australia. Proc. of the Linnean Soc. NSW 127, 157–174.
- Troeh, F.R., Thompson, L.M., 2005. Soils and soil fertility. 6th Ed. Australia. (489 pp.)
- United States Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook 60. USDA, Washington, D.C. (159 pp).
- USDA–NRCS., 2010. Field indicators of hydric soils in the United States, version 7.0. En: Vasilas, L.M., Hurt, G.W., Noble, C.V. (Eds.), United States Department of Agriculture–Natural Resources Conservation Service, in cooperation With the National Technical Committee for Hydric Soils. Washington, DC. pp. 45
- Valero-Garcés, B.L., Navas, A., Machín, J., Stevenson, T., Davis, B., 2000. Responses of a saline lake ecosystem in a semiarid region to irrigation and climate variability. *Ambio* 29, 344-350.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. Procedures for Soil Analysis. Sixth ed. ISRIC-FAO. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen. The Netherlands. (120 pp).
- Van Veldhoven, P.P., Mannaerts, G.P., 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. *Anal. Biochem.* 161, 45–48.
- Ventura, Y., Eshel, A., Pasternak, D., Sagi, M., 2015. The development of halophyte-based agriculture: past and present. *Ann Bot-London* 115, 529-540.
- Vepraskas, M.J., 1994. Redoximorphic features for identifying aquic conditions. Tech. Bull. 301, NC Agric. Res. Serv, Raleigh. (Revised and reprinted 1994).
- Vepraskas, M.J., Faulkner, S.P. 2001. Redox chemistry of hydric soils. In: Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification (eds J.L. Richardson, M.J. Vepraskas), pp. 85–106. CRC Press, LLC, Boca Raton, FL. USA.
- Vinogradov, B.V., 1955. Macropolygonal structure of clay plains. *Doklady Akademi Nauk SSSR*, 104: 118–120. Translated into English in J.T. Neal (Ed.): Playas and dried lakes. Benchmark Papers in Geology 20, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, pp. 323–326.
- Vought, L.B., Dahl, J., Lauge Pedersen, C., Lacoursière, J.O., 1994. Nutrient retention in riparian ecotones. *Ambio* 23, 342-348.
- Wang, Q., Bai, J., Huang, L., Deng, W., Xiao, R., Zhang, K., 2011. Soil nutrient distribution in two typical paddy terrace wetlands along an elevation gradient during the fallow period. *J. Mt. Sci.* 8, 476-483.

- Williams, W.D., 2002. Environmental threats to salt lakes and the likely status of inland saline ecosystems in 2025. *Environ. Conserv.* 29, 154–167.
- Yoon, T.K., Noh, N.J., Han, S., Kwak, H., Lee, W.-K., Son, Y., 2015. Small-scale spatial variability of soil properties in a Korean swamp. *Landscape Ecol. Eng.* 11, 303-312.
- Zenkovich, V.P., 1967. *Processes of Coastal Development*. Oliver and Boyd, Edinburgh, (378 pp).
- Zhao, S., Zhou, N. Q., Shen, X. P., 2016. Driving mechanisms of nitrogen transport and transformation in lacustrine wetlands. *Sci. China Earth Sci*, 59, 464-476.
- Zhengchao, Z., Zhuoting, G., Zhouping, S., Fuping, Z., 2013. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid crop. *Eur. J. Agron.* 45, 20-26.



ANEJOS

ANEJO I.

Datos de la estación de Tornos

En el Anejo I se ha recopilado el número de días a completar con datos diarios de precipitación en la estación meteorológica de Tornos para la serie de datos de precipitación desde 1943 hasta su cierre en agosto de 2015.

Al. Tabla 1. Días a completar con datos diarios de precipitación en la estación meteorológica de Tornos (1943–2015).

Año	Mes												Días a completar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1943												1	1
1944			1					1	5	1	1		9
1945					31		1			2			34
1946					2				2			3	7
1947					1				1				2
1948	2		1	2			1	1	2	2		2	13
1949		3	2	2	4		1		2	2	4	2	22
1950	1												1
1951				1	2								3
1952									1				1
1953			2	1					1				4
1954					1			1		1	1	1	5
1955					2								2
1958				1									1
1959											30		30
1963			1		1		2						4
1964	1		2		1					2	1	1	8
1965	4		2	1	1	2		2	3		1		16
1966				2									2
1967		1			1	2		1		1	1	3	10
1968		1			1	1			1	1			5
1969	1	2	1		1	1					2	2	10
1970		1	1		1	1			1	1			6
1971	2		1					1			1	1	6
1972									30				30
1973									30				30
1975												2	2
1976		1						31					32
1977				2			1					2	5
1978	1	3	1	3			1		1		3	1	14
1979	1		4	2	1	1			1	2	1	2	15
1980	3		3	3		1	1	1		3			15
1981		2	3	1		1	2	2				4	15
1982			1	2	2	1		1		3	1	6	17

Al. Tabla 1. (cont.). Número de días a completar con datos diarios de precipitación en la estación meteorológica de Tornos (1943–2015).

Año	Mes												Días a completar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1983		6	2	6	2	6	2		2	1	1		28
1984	3	4	3	1	1	1		1		1	1	2	18
1985	4	3	2	2	2	1	3		2	3	3	1	26
1986	3		2	4	1	2	1				1		14
1987		1	2		2	1		1	1	1	1		10
1988	3	2			2	30	3		2				42
1989		2	1	2	31	3			1			2	42
1990	2	1	1	3	1	30	2	1		3	1		45
1991	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	15
1992	3		3	3	3	2	2	1	2	1	1		21
1993			2	2		11	1	5	3	1	2	4	31
1994	4	1		2	5	2	3	2	1	1	1		22
1995		1	2	1		1	1		5	3		1	15
1996	8		1	1	2	1	1	1	3	2		1	21
1997	1	1		2	1			4	3	1	1		14
1998		1			2			1		1			5
1999	1	1	1	2			1	2	1	1		3	13
2000			1		4	1		2	1		3		12
2001		2	3	1	2			2		2	1	1	14
2002	1				2	1					2	1	7
2003	1	1	1			1		1		2			7
2004	1		3	2	2	2				2	1		13
2005	1	1	1	5								1	9
2006	1	28	2		1		1	1					34
2007	2	1	4										7
2008	1						1	1	1				4
2009	1	1				1					2	3	8
2010		1	2	1				1			1		6
2011							8					2	10
2012	1	2	1										4
2013	1												1
2014													0
2015													0
Total	60	77	68	65	120	109	41	70	110	48	71	56	895

ANEJO II.

Caracterización de muestras de agua

El Anejo II recoge la caracterización de las muestras de agua freática y superficial. (Ver Capítulo 3 Figura 1 para su localización).

AII. Tabla 1. Datos físicos y químicos de las muestras de agua freática y superficial, su procedencia y localización.

Muestra	Procedencia	Localización	Prof. cm	pH	CE	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					dS m ⁻¹	mg L ⁻¹													
GA19	Calicata	Prados salinos	84	7.3	52.5	0.6	18589.5	0.0	28.2	12.0	0.0	9135.9	0.0	n.d.	6009.4	0.0	219.6	489.2	2389.8
GA20	Calicata	Prados salinos	172	7.1	42.1	0.7	14786.9	0.0	22.5	83.0	0.0	7046.1	0.0	n.d.	4839.1	0.0	184.8	420.2	2073.3
GA21	Calicata	Prados salinos	146	8.2	1.5	0.5	194.5	0.0	0.5	106.6	0.0	174.2	0.0	n.d.	67.9	0.6	3.2	64.5	73.2
GA22	Calicata	Cultivos	95	7.3	0.9	0.3	81.5	0.0	0.0	122.5	0.0	68.0	0.0	n.d.	32.5	0.0	1.5	59.0	35.9
GA25	Calicata	Cultivos	170	7.8	0.7	0.6	30.5	0.1	0.1	74.7	0.0	46.0	0.0	48.8	13.7	0.7	8.0	84.6	34.4
GA26	Calicata	Cultivos	160	7.5	0.8	1.1	33.6	0.1	0.2	98.9	0.0	95.1	0.0	73.2	24.2	0.5	3.9	76.5	51.9
GA27	Calicata	Prados salinos	152	7.4	46.1	1.4	13817.5	0.0	23.0	0.5	0.0	8777.7	0.0	341.7	6136.2	0.0	137.9	719.5	3159.3
GA28	Calicata	Fondo	90	6.4	110.9	0.7	52530.8	0.0	77.0	3.8	0.0	32088.7	0.0	366.1	24665.9	0.0	959.9	582.4	8823.3
GA28-IRIS (punto 5)	Sondeo	Fondo	100	6.7	104.0	0.4	56690.7	0.0	79.8	0.0	0.0	29408.3	0.0	854.3	25855.6	20.6	730.2	682.2	11751.9
GA29	Calicata	Fondo	80	6.3	114.4	0.0	52536.3	0.0	76.9	3.9	0.0	29083.7	0.0	427.1	19473.9	0.0	768.7	448.1	8277.6
GA30	Superficie	Laguna	0	7.2	39.9	0.2	13678.4	0.0	20.9	0.5	0.0	6399.2	0.0	549.2	6343.6	0.0	276.8	851.6	2392.1
GA30-IRIS (punto 4)	Sondeo	Fondo	28	7.1	58.5	1.7	24737.2	0.0	35.4	26.5	0.0	10594.8	0.0	549.2	12346.2	7.9	379.1	991.1	4893.1
GA33	Calicata	Lagunazos	155	7.3	87.1	1.3	35140.8	0.0	68.9	3915.6	0.0	34667.3	0.0	244.1	17396.2	0.0	139.3	643.9	12033.1
GA34	Calicata	Lagunazos	130	7.3	83.0	1.4	36500.7	0.0	53.6	429.1	0.0	25287.6	0.0	244.1	16309.5	0.0	221.9	685.7	8951.7
GA36	Calicata	Lagunazos	90	8.2	4.9	2.5	670.6	0.0	1.6	0.3	0.0	1529.3	0.0	244.1	678.2	0.3	24.3	73.6	388.5
GA48-IRIS (punto 2)	Sondeo	Lagunazos	23	6.9	17.5	1.2	4984.7	0.0	8.5	19.4	0.0	5487.3	0.0	488.2	3269.0	2.0	74.4	225.2	1295.9
GA50	Sondeo	Reguera	0	8.3	3.0	0.3	604.4	0.0	0.6	0.2	0.0	410.2	0.0	671.2	367.2	0.0	38.3	68.5	240.3
GA53-IRIS (punto 3)	Sondeo	Reguera	27	8.2	2.0	0.2	369.7	0.0	0.6	0.3	0.0	216.7	0.0	366.1	153.3	0.4	4.6	149.2	99.4

All. Tabla 1. (cont.). Datos físicos y químicos de las muestras de agua freática y superficial, su procedencia y localización.

Muestra	Procedencia	Localización	Prof. cm	pH	CE dS m ⁻¹	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
mg L ⁻¹																			
GA54-IRIS (punto 1)	Sondeo	Reguera	10	8.1	2.2	0.3	351.6	0.0	0.5	0.4	0.0	442.8	0.0	610.2	156.1	0.4	3.3	167.6	158.6
GA55	Calicata	Lagunazos	168	8.5	1.3	2.2	115.5	0.5	0.5	42.8	0.0	253.9	0.0	732.2	66.1	0.1	4.2	88.8	99.3
GA57	Calicata	Lagunazos	200	7.5	66.9	2.6	28197.8	0.0	43.0	125.5	0.0	22787.8	0.0	427.1	12714.0	0.0	191.7	839.0	7439.8
GA58	Calicata	Lagunazos	180	7.1	106.0	2.0	54787.9	0.0	78.4	289.5	0.0	33451.9	0.0	305.1	24338.1	0.0	476.3	720.8	13173.5
GA61	Calicata	Lagunica	155	8.3	0.6	0.3	38.7	0.0	0.2	88.0	0.0	35.3	0.0	427.1	14.2	0.7	2.9	72.6	33.2
GA62	Calicata	Lagunica	132	8.1	0.8	0.4	56.5	0.0	0.3	42.6	0.0	105.3	0.0	427.1	25.0	0.7	5.3	77.4	58.8

ANEJO III.

Descripción macromorfológica de suelos

El Anejo III está dividido en dos partes:

AIII-1. Información básica y fotografía de campo del perfil de suelo y su entorno. La localización de cada perfil se muestra en la Figura 1 del Capítulo 3.

AIII-2. Descripción sistemática de cada horizonte en campo. Queda recogida en las dos tablas siguientes:

AIII-2. Tabla 1: incluye el nombre del horizonte, profundidad, tipo de límite inferior de cada horizonte, color de la matriz, estado redox, descripción completa de manchas y elementos gruesos, consistencia y tipo de cementación.

AIII-2. Tabla 2: incluye de cada horizonte: la descripción de la estructura, actividad biológica, presencia de raíces, estudio de superficies, acumulaciones y posible horizonte de diagnóstico.

AIII-1. Descripción básica y fotos de campo de los perfiles y su entorno.

GA19 (Bello)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	84
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Acuico
Litología. Materiales originarios	Material detrítico fino
Pedregosidad superficial	<2%
Geomorfología	Llanura de inundación
Pendiente general	<1%
Vegetación	<i>Salicornia ramosissima</i> y <i>Puccinellia pungens</i>
Usos del territorio	Pradera de vegetación natural
Tecnología de suelos	Pradera de vegetación natural



Figura 1. Fotos y descripción básica del perfil GA19 y su entorno.

GA20 (Bello)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	172
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Acuico
Litología. Materiales originarios	Alternancia de material detrítico
Pedregosidad superficial	<2%
Geomorfología	Pequeña hondonada en zona de encharcamiento de la Laguna
Pendiente general	<2%
Vegetación	<i>Salicornia ramosissima</i> y <i>Puccinellia pungens</i>
Usos del territorio	Pradera de vegetación natural
Tecnología de suelos	Ecotono



Figura 2. Fotos y descripción básica del perfil GA20 y su entorno.

GA21 (Bello)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	146
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Ácuico
Litología. Materiales originarios	Alternancia de material detrítico
Pedregosidad superficial	<2%
Geomorfología	Domo con pequeñas hoyas suavizadas. Terraza lacustre
Pendiente general	<2%
Vegetación	<i>Puccinellia pungens</i> y <i>Limonium</i> sp.
Usos del territorio	Pradera de vegetación natural
Tecnología de suelos	Ecotono



Figura 3. Fotos y descripción básica del perfil GA21 y su entorno.

GA22 (Bello)



Clase de drenaje	Muy bien drenado
Nivel freático, cm	95
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos detríticos terrígenos
Pedregosidad superficial	<2%
Geomorfología	Vaguada. Zona de inundación
Pendiente general	<2%
Vegetación	Cereal
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano



Figura 4. Fotos y descripción básica del perfil GA22 y su entorno.

GA23 (Tornos)

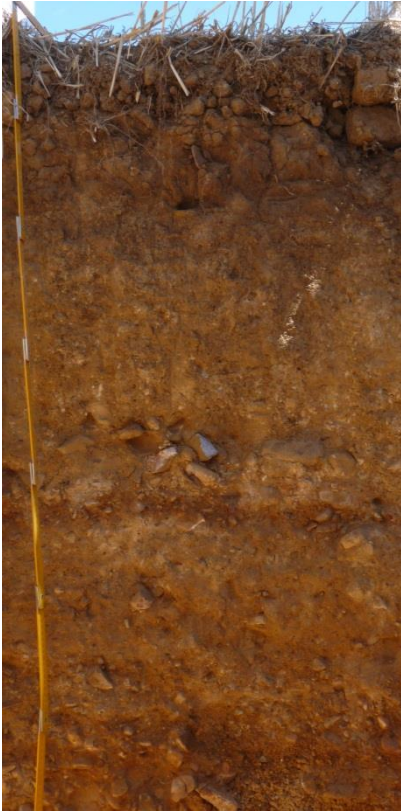


Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	No alcanzado
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos detríticos gruesos
Pedregosidad superficial	75%
Geomorfología	Pendiente de abanico. Hoya.
Pendiente general	2-7%
Vegetación	Rastrojo recién cortado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano



Figura 5. Fotos y descripción básica de los perfiles GA23 y GA24 y su entorno.

GA24 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	No alcanzado
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos detríticos gruesos (brechas)
Pedregosidad superficial	40%
Geomorfología	Subnivel dentro de abanico aluvial. Domo.
Pendiente general	2-7%
Vegetación	Rastrojo recién cortado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano

Figura 6. Foto y descripción básica del perfil GA24.

GA25 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	170
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos detríticos
Pedregosidad superficial	-
Geomorfología	Fondo de abanico aluvial. Domo.
Pendiente general	2-7%
Vegetación	Rastrojo recién cortado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano

Figura 7. Foto y descripción básica del perfil GA25.

GA26 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	160
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos detríticos
Pedregosidad superficial	<2%
Geomorfología	Terraza lacustre. Fondo.
Pendiente general	2-7%
Vegetación	Rastrojo recién cortado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano



Figura 8. Fotos y descripción básica del perfil GA26 y su entorno.

GA27 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	152
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimentos
Pedregosidad superficial	No tiene
Geomorfología	Playa. Orilla con vegetación
Pendiente general	2-7%
Vegetación	<i>Salicornia ramosissima</i> y <i>Puccinellia pungens</i>
Usos del territorio	Pradera de vegetación natural
Tecnología de suelos	Ecotono



Figura 9. Fotos y descripción básica del perfil GA27 y su entorno.

GA28 (Tornos)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	90
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Ácuico
Litología. Materiales originarios	Sedimento lagunar
Pedregosidad superficial	No tiene
Geomorfología	Fondo lagunar desnudo
Pendiente general	<1%
Vegetación	Sin vegetación
Usos del territorio	Fondo lagunar
Tecnología de suelos	-



Figura 10. Fotos y descripción básica del perfil GA28 y su entorno. Acumulación de sales en el fondo desnudo de la laguna.

GA29 (Bello)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	80
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Ácuico
Litología. Materiales originarios	Sedimento lagunar con detríticos distales
Pedregosidad superficial	No tiene
Geomorfología	Fondo lagunar desnudo
Pendiente general	<1%
Vegetación	Sin vegetación
Usos del territorio	Fondo lagunar
Tecnología de suelos	-



Figura 11. Fotos y descripción básica del perfil GA29 y su entorno.

GA33 (Bello)



Clase de drenaje	Moderadamente/ Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	155
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimento detríticos finos
Pedregosidad superficial	No tiene
Geomorfología	Fondo endorreico
Pendiente general	<1%
Vegetación	<i>Puccinellia</i> sp., <i>Hordeum</i> sp. y <i>Spergularia</i> sp.
Usos del territorio	Pastoreo de intensidad marginal
Tecnología de suelos	-



Figura 12. Fotos y descripción básica del perfil GA33 y su entorno.

GA34 (Bello)



Clase de drenaje	Imperfectamente drenado
Nivel freático, cm	135
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Ácuico
Litología. Materiales originarios	Sedimento detríticos finos
Pedregosidad superficial	No tiene
Geomorfología	Fondo endorreico
Pendiente general	<1%
Vegetación	<i>Limonium</i> sp. y <i>Frankenia pulverulenta</i>
Usos del territorio	Pastoreo de intensidad marginal
Tecnología de suelos	-



Figura 13. Fotos y descripción básica del perfil GA34 y su entorno.

GA35 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Alcanzado a 3 m con sondeo
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Sedimento detríticos finos. Barra de arena
Pedregosidad superficial	<1% graverosidad
Geomorfología	Divisoria en forma de loma
Pendiente general	<1%
Vegetación	Barbecho sembrado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano

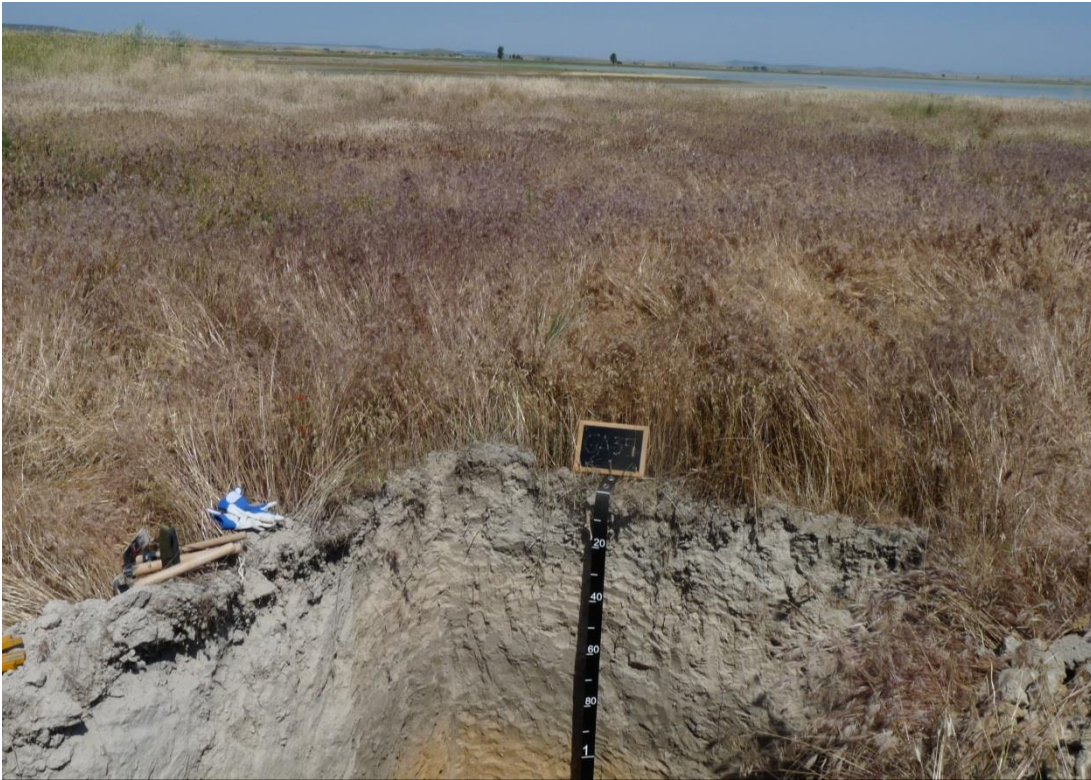


Figura 14. Fotos y descripción básica del perfil GA35 y su entorno.

GA36 (Tornos)



Clase de drenaje	Insuficientemente drenado
Nivel freático, cm	90
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales carbonatados lagunares
Pedregosidad superficial	<1%
Geomorfología	-
Pendiente general	<1%
Vegetación	<i>Elymus</i> sp., <i>Juncus</i> sp.
Usos del territorio	Pradera naturalizada
Tecnología de suelos	-



Figura 15. Fotos y descripción básica del perfil GA36 y su entorno.

GA37 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	5-10%
Geomorfología	Abanico aluvial
Pendiente general	<2%
Vegetación	Restos de cosecha
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 16. Fotos y descripción básica del perfil GA37 y su entorno.

GA38 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	5-10%
Geomorfología	Abanico aluvial
Pendiente general	<2%
Vegetación	Restos de cosecha
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 17. Fotos y descripción básica del perfil GA38 y su entorno.

GA39 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	5-20%
Geomorfología	Abanico aluvial
Pendiente general	1-2%
Vegetación	Restos de cosecha
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 18. Fotos y descripción básica del perfil GA39 y su entorno, Bello.

GA40 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Metaarenitas-cuarcita
Graverosidad y rocosidad	20% y 50%
Geomorfología	Ladera
Pendiente general	18%
Vegetación	Matorral y herbazal
Usos del territorio	Monte
Tecnología de suelos	-



Figura 19. Fotos y descripción básica del perfil GA40 y su entorno.

GA41 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Metaraenitas-cuarcita
Pedregosidad superficial	>50%
Geomorfología	Ladera
Pendiente general	5%
Vegetación	Matorral y herbazal
Usos del territorio	Monte
Tecnología de suelos	-



Figura 20. Fotos y descripción básica del perfil GA41 y su entorno.

GA55 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	150
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos finos
Pedregosidad superficial	<1%
Geomorfología	Terraza lacustre
Pendiente general	<1%
Vegetación	-
Usos del territorio	Pradera natural
Tecnología de suelos	-



Figura 21. Fotos y descripción básica del perfil GA55 y su entorno.

GA56 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	No alcanzado
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	<1%
Geomorfología	Cordón de duna
Pendiente general	<1%
Vegetación	
Usos del territorio	Pradera natural
Tecnología de suelos	-



Figura 22. Fotos y descripción básica del perfil GA56 y su entorno.

GA57 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	200
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales finos de carácter lagunar
Pedregosidad superficial	<5%
Geomorfología	Barra litoral
Pendiente general	<1%
Vegetación	<i>Puccinellia</i> sp., <i>Plantago</i> sp.
Usos del territorio	Pradera natural
Tecnología de suelos	-



Figura 23. Fotos y descripción básica del perfil GA57 y su entorno.

GA58 (Bello)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	180
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales finos de carácterlagunar
Pedregosidad superficial	2-5%
Geomorfología	Fondo endorreico
Pendiente general	<1%
Vegetación	Suelo desnudo
Usos del territorio	Paraje natural
Tecnología de suelos	-



Figura 24. Fotos y descripción básica del perfil GA58 y su entorno.

GA59 (Tornos)



Clase de drenaje	Deficientemente drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	2-5%
Geomorfología	-
Pendiente general	<1%
Vegetación	Herbazal
Usos del territorio	Paraje natural
Tecnología de suelos	-



Figura 25. Fotos y descripción básica del perfil GA59 y su entorno.

GA61 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	155
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Transición entre detrítico y fino
Pedregosidad superficial	-
Geomorfología	-
Pendiente general	<1%
Vegetación	-
Usos del territorio	-
Tecnología de suelos	-

Figura 26. Foto y descripción básica del perfil GA61.

GA62 (Tornos)



Clase de drenaje	Mal drenado
Nivel freático, cm	70
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Ácuico
Litología. Materiales originarios	Materiales detríticos aluviales
Pedregosidad superficial	<5%
Geomorfología	Fondo lacustre
Pendiente general	<1%
Vegetación	Suelo arado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura de secano



Figura 27. Fotos y descripción básica del perfil GA62 y su entorno.

GA63 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material fino
Pedregosidad superficial	5-10% (y 10-15% graverosidad)
Geomorfología	Suave ladera de abanico
Pendiente general	4-5%
Vegetación	Arvenses y ruderales
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 28. Fotos y descripción básica del perfil GA63 y su entorno.

GA64 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material fino
Pedregosidad superficial	5-10% (y 10-15% graverosidad)
Geomorfología	Suave ladera de abanico
Pendiente general	4-5%
Vegetación	Arvenses y ruderales
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 29. Fotos y descripción básica del perfil GA64 y su entorno.

GA65 (Las Cuerlas)

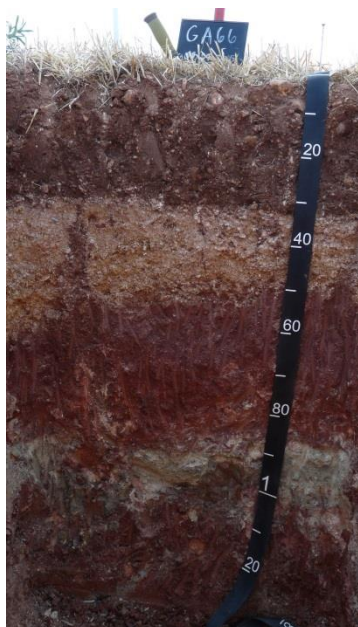


Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material fino
Pedregosidad superficial	70% (y 70% graverosidad)
Geomorfología	Vertiente de abanico
Pendiente general	<2%
Vegetación	Arvenses y ruderales
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 30. Fotos y descripción básica del perfil GA65 y su entorno.

GA66 (Las Cuerlas)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material detrítico
Pedregosidad superficial	40% (y 40% graverosidad)
Geomorfología	Vertiente de abanico
Pendiente general	2-5%
Vegetación	Trigo cosechado
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 31. Fotos y descripción básica del perfil GA66 y su entorno.

GA67 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material fino y grueso
Pedregosidad superficial	<5
Geomorfología	Barra arenosa
Pendiente general	<2%
Vegetación	Arvenses y ruderales
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano

Figura 32. Foto y descripción básica del perfil GA67.

GA68 (Tornos)



Clase de drenaje	Bien drenado
Nivel freático, cm	Inaccesible
Régimen de temperatura	Mésico
Régimen de humedad	Xérico
Litología. Materiales originarios	Material fino
Pedregosidad superficial	-
Geomorfología	Barra arenosa
Pendiente general	<2%
Vegetación	Arvenses y ruderales
Usos del territorio	Agricultura
Tecnología de suelos	Agricultura intensiva de secano



Figura 33. Fotos y descripción básica del perfil GA68 y su entorno.

ANEJO III-2. Descripción macromorfológica sistemática

AIII-2. Descripción macromorfológica sistemática.

AIII-2. Tabla 1. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Ac: Acumulación. Asoc.: Asociación. C: Canto. Dist.: Distribución. EG: Elementos gruesos (> 2mm). gf: grava fina. gg: grava gruesa. gm: grava media. Horz.: Horizonte. Inf: Inferior. m: Matriz. M: Mancha. n.d.: No determinado. Ox.: Oxidación. Prof.: Profundidad. Red.: Reducción. Sup: Superior. SL: Stone line. vol.: Volumen. *Sondeo. **muestra del mismo horizonte.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG				Consistencia	Cementación
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol	Distr.		
GA19 Typic Aquisalid														
Ag	0–10	Abrupto y plano	2.5Y 6/2	Red.	de Ox. (herrumbre). Asoc. a poros, raíces y galerías (porelining)	7.5YR 6/6	5-15	2-20	No hay				Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico	No
2Cg1	10–25	Neto y plano	2.5Y 6.5/1.5	Ox.-Red.	de Ox. Asoc. a poros y raíces y galerías que disminuyen en profundidad	10YR 6/6	<1	1-2	No hay				Poco compacto. Adherente. Muy plástico	No
2Cg2	25–90	Neto y plano	2.5Y 7/1.5	Red.	No hay				No hay				Poco compacto. Adherente. Muy plástico	No
3Cg3	90+		2.5Y 7/4	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.
GA20 Typic Haplosalid														
Ag	0–15	Muy abrupto y plano	2.5Y 4/2	Red.-Ox.	de Ox (herrumbre). Asoc. a poros y raíces	7.5YR 6/8	1-2	2-20	No hay				Poco compacto. Muy friable	No
Cg1	15–48	Abrupto y plano	5Y 6.5/2	Red.-Ox.	de Ox. Asoc. a poros y raíces	2.5Y 7/8	<1	2-20	Tabular redondeado	gf-gm	6-15	Base horiz.	Poco compacto. Friable	No
2Cg2	48–70	Abrupto y ondulado	Sup: 5Y 8/1. Inf:10YR 7/4	Red.-Ox. y Red.	M1: de Ox. M2: de Red.	M1: 10YR 6/8 M2: 10YR 7/3	M1:5-15 M2: 5-15	M1: 2-20. M2: 20-50	Tabular redondeado	gf	1-5	Todo horiz.	Compacto. Firme	No
3Cg3	70–107/114	Abrupto y ondulado	Sup: 5Y 8/1. Inf:10YR 7/5	Red. y Ox.-Red.	de Red.	5Y 6/7.	5-15	2-20	Tabular redondeado y alguno angular	gf-gg	50-70	Todo horiz.	Compacto. Firme	No
4Cg4	107/114–170		2.5Y 6.5/4	Ox.-Red.	M1: de Ox. M2: de Red.	M1:10YR 6/8 M2: 2.5YR 7/2	M1:5-15 M2: >15	M1: 2-20. M2: 30-50	Tabular redondeado y alguno angular	gf-gm	1-5	Todo horiz.	Compacto. Adherente. Ligeramente plástico	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación	
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.			
GA21 Aquic Calcixerept															
A	0–16/23	Gradual y plano	2.5Y 4/2	Ox.	No hay				Redondeado esferoidal	gm	1-5		Poco compacto. Friable	No	
Bwk	16/23–50	Abrupto y plano	2.5Y6/3	Ox.	No hay				Redondeado esferoidal	gf-gg	16-35		Compacto. Friable	No	
2Ckg1	50–112/116	Abrupto y plano	7.5YR 5/8	Ox.-Red.	de Red. Asoc. a los poros.	7.5YR 7/2	5-15	2-20	Redondeado esferoidal	gf-gg	50-70	Todo horiz.	Compacto. Muy friable	Muy fuertemente cementado. Base del horiz. Discontinua. Silíceo y carbonatado. Conglomerático. 7 -10 cm	
3Ckg2	112/116–150	Abrupto y ondulado	10YR 7/6	Red.	M1 y M2: de Red. Sin relación con otros caracteres. M2: Ferromangánicas.	M1: 2.5Y 8/3 M2: 2.5Y 4/3	M1: 5-15 M2: >15	M1:2-20. M2: 20-50	Redondeado esferoidal	gm	<1	Todo horiz.	Compacto. No adherente. Ligeramente plástico. Firme	No	
4C	150+		7.5YR 5/8	n.d.	n.d.				Redondeado esferoidal				n.d.	n.d.	
GA22 Typic Calcixerept															
Ap	0–38/44	Abrupto y ondulado	2.5Y 3.5/2	Ox.	No hay				Redondeado esferoidal. No alterados	gf-gm	6-15		Poco compacto. Friable	Muy débilmente cementado	
Bwk	38/44–66/84	Neto y ondulado	10YR 6/4	Ox.	de Ox. Asoc. a EG	7.5YR 6/6	2-5	<1	Redondeado esferoidal. No alterados	gf	16-35		Compacto. Friable	Muy débilmente cementado	
Ck1	66/84–110	Abrupto y plano	7.5YR 6.5/4	Ox.	de Ox. Sin relación con otros caracteres	5YR 5/4	>15	1-2	Redondeado esferoidal	gf	50-70		Compacto. Muy friable	Muy débilmente cementado	
2C2	110–125*	Abrupto y plano	2.5Y 6/6	Ox.-Red.	M1: de Ox. Bandas. M2: de Red. Sin relación con otros caracteres	M1: 10YR 6/8 M2: 2.5Y 7/1	M1: 5-15 M2: 2-5	M1: 2-20. M2: 20-50	Subredondeado. Esferoidal y tabular	gf	6-15		Poco compacto. No adherente. Muy plástico	No	

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
3C3	125–155*		m1: 2.5Y 6/3. m2: 2.5Y 7/4	Ox.- Red.	M1: de Ox. Bandas. M2: de Red. Sin relación con otros caracteres. M3: de Ox. de Mn.	M1: 7.5YR 6/8 M2: 5Y 7/2 M3: 7.5YR 2.5/1	M1: 5- 15 M2: 2-5 M3: <1	M1: 20- 50. M2: 2- 20. M3:-		gf	1-5		Poco compacto. No adherente. Plástico	No
GA23 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–28/31	Abrupto y ondulado	7.5YR 3.5/3.5	Ox.	No hay				Tabular subangular Fragmentos de horiz. petrocálcico	gf-gg	50-70	Regular	Compacto. Ligeramente duro	No
Bkm1 Bkm2	y 28/31–38 38–60	y Neto y plano	m1: 10YR 7.5/6. m2: 2.5YR 5/8	Ox.	Bandas de carácter ródico	2.5 YR 5.5/8	<1	1-2	No hay				n.d.	No
GA24 Typic Calcixerept														
Ap1	0–14	Abrupto y plano	10YR 3.5/4	Ox.	No hay						<1		Poco compacto. Duro	No
Ap2	14–29/34	Abrupto y ondulado	10YR 5/4	Ox.	No hay					gf	<1		Compacto. Muy duro	No
Ck1	29/34–65/75	Abrupto y ondulado	7.5YR 4.5/6	Ox.	No hay				Sin orientación. Cuarcíticos.	gf-gm	1-5	Aumentan en prof.	Compacto. Ligeramente duro	No
2Ck2	65/75– 105/110 SL	Abrupto y ondulado	5YR 5/8	Ox.	No hay				Cuarcíticos. SL	gf-gg	36-70		Compacto. Duro	No
3Ck3	105/110– 135/140 SL	Abrupto y ondulado	5YR 6/8	Ox.	No hay				Cuarcíticos. SL	gf-gg	36-70		Compacto. Duro	No
4Ck4	135/140– 175	Abrupto y ondulado	7.5YR 5/8	Ox.	No hay					gg-c	>70		n.d.	No
5Ck5	175–185		n.d.	n.d.	n.d.					gf	36-70		Compacto. Duro	n.d.

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG		Distr.	Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol			
GA25 Pachic Calcixeroll														
Ap	0–35/40	Abrupto y ondulado	10YR 3/2	Ox.	No hay				Redondeado. Paleozoicos.	gf	<1		Compacto. Muy duro	No
A	35/40–50/55	Gradual y ondulado	10YR 4/2	Ox.	de Ox. Sin relación con otros caracteres.	10 YR 5/5	1-2	2-20	Redondeado. Paleozoicos.	gf	1-5		Compacto. Muy duro	No
Bwk	50/55–100	Abrupto y plano	2.5Y 6/3	Ox.	de Ox. Sin relación con otros caracteres.	10 YR 7/8	<1	1-2	Redondeado. Paleozoicos.	gf	1-5		Compacto. Muy duro	No
2C	100–125/135	Abrupto y ondulado	10YR 4/2	Ox.	de Ox. Sin relación con otros caracteres.	10YR 5/8	2-5	2-20	Redondeado. Paleozoicos.	gm	16-35		n.d.	No
3Ck	125/135–180	n.d.	7.5YR 6/8	Ox.	No hay				Redondeado. Paleozoicos.	gf	6-15		Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico	No
GA26 Pachic Calcixeroll														
Ap(1 y 2)	0–29/33	Ap1: Abrupto y plano. Ap2: Abrupto y ondulado	10YR 3/2	Ox.	No hay					gf	<1		Poco compacto. Duro	No
A	29/33–60	Gradual y plano	2.5Y 3/2	Ox.-Red.	de Ox. Asoc. a caras de los elementos de estructura y a poros de raíz.	10 YR 5/4	<1	2-20		gf	<1		Compacto. Duro	No
Bwk	60–131/136	Abrupto y ondulado	2.5 Y 7/2	Ox.	n.d.				No hay				Poco compacto. Ligeramente adherente. Muy plástico. Friable	No
2Ck	131/136–165	Abrupto y plano	2.5Y 6/4	Ox.	de Ox. Sin asoc. aparente.	10 YR 7/8	>15	>50		c	6-15		Compacto. Muy friable	Muy débilmente cementado
3C	165–180		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG			Consistencia	Cementación	
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol			Distr.
GA27 Typic Haplosalid														
Ayz	0–12	Abrupto y plano	10YR 5/2	Ox.	No hay				Redondeado	gf	<1		Compacto. Suelto	No
2C	12–84/90	Abrupto y ondulado	2.5Y 7/1	Ox.	No hay				No hay				Poco compacto a Compacto. Friable	No
3C	84/90–115/120	Neto y ondulado	2.5Y 5/2	Ox.	M1 y M2: de Ox. Sin relación con otros caracteres. M3: de Red. Sin relación con otros caracteres.	M1: 7.5YR 5/8 M2: 2.5Y 6/2 M3: 5Y 7.5/2	M1: 2-5 M2: 2-5 M3: 1-2	M1: >50. M2:>50. M3: 1-2	No hay				Poco compacto a Compacto. Friable	No
4C	115/120–170		10YR 6/3	Ox.-Red.	M1 y M2: de Ox. Sin relación con otros caracteres.	M1: 7.5YR 5/8 M2: 2.5Y 6/2	M1: 2-5 M2: 2-5	M1: >50. M2:>50	Redondeado	gm	1-5		Poco compacto. Ligeramente adherente. Plástico	No
GA28 Gypsic Aquisalid														
Aygz	0–6/10	Abrupto y ondulado	10B 2.5/1	Red.	No hay				No hay				Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico. Moderadamente fluido	No
Cyg1	6/10–14/16	Ligeramente ondulado y abrupto	m1:10B 2.5/1.m2: 5Y 6/1	Red.	de Red. Sin relación con otros caracteres.	5Y 6/1		20-40	No hay				Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico. Moderadamente fluido	No
Cyg2	14/16–24	Muy abrupto y plano	10B 5.5/1	Red.	de Red. Sobre lámina de yeso. Lechadas con el color de la matriz.	10B 5.5/2			No hay				Poco compacto. Adherente. Plástico. Moderadamente fluido	No
2Cyg3	24–42	Abrupto y plano	2.5GY 6/1	Red.	de Red. Sin relación con otros caracteres.	10B 4.5/1	5-15 y >15		No hay				Poco compacto. Adherente. Plástico. Moderadamente fluido	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
2Cyg4	42–90 106*	90– Abrupto y plano	7.5GY 6/1	Red.	No hay				No hay				Plástico. Adherente y no fluido. Muy adherente en húmedo	No
3Cyg5	106–110*	Abrupto y plano	10Y 7/1.5	Red.	n.d.				No hay				n.d.	No
4Cyg6	110–115*	Abrupto y plano	2.5Y 7/4	Ox.- Red.	n.d.				No hay				n.d.	No
5Cy1	115–148*	Gradual y plano	10YR 6/5	n.d.	n.d.				Redondeado esferoidal. Sin relación aparente. De cuarzo		<1		n.d.	n.d.
6Cy2	148–160*	Abrupto y plano	7.5YR 5.5/6	Ox.	No hay				No hay				n.d.	No
7C	160–185*		5YR 3.5/4	Ox.	No hay				n.d.				n.d.	n.d.
GA29 Gypsic Aquisalid														
Aygz	0–6/8	Abrupto y ondulado	7.5B 2.5/1	Red.- Ox.	M1 y M2: de Ox. (reoxidación). Asoc. a grietas y dentro de ellas. En Bandas.	M1: 2.5Y 6/3 M2: 5YR 5/6	M1 y M2: 1	M1 y M2: 2-5	No hay				Poco compacto	No
2Cyg1	6/8–24	Abrupto y plano	m1: 7.5Y 6/1. m2: 10B 4.5/1	Red.- Ox.	de Ox. (reoxidación) . M1: Asoc. a canales de raíces. M2: Asoc. a grietas. M3: Sin relación con otros caracteres	M1: 2.5Y 6.5/2 M2: 7.5YR 6/6 M3: Negro- azulada		M1: 2- 10. M2: <2. M3: 20- 50	No hay				Poco compacto	No
3Cyg2	24– 80	No visible	m1: 5GY 6/1 Sondeo: 7.5GY 7/1	Red.- Ox.	No hay				No hay				Poco compacto	No
4Cyg3	80–110*	SL	5Y 7/1	Red.	No hay				Arenas redondeadas				n.d.	n.d.
5Cg	110–140*	No visible	n.d.	Red.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.
6Cg	140–170*		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG			Consistencia	Cementación	
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol			Distr.
GA33 Typic Aquisalid														
Az	0–21	Neto y plano	2.5Y 5.5/3	Ox.-Red.	No hay				Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. Poco alterado	gf-gm	5-15	Regular	Compacto. Friable	No
Cz	21–28/39	Abrupto y ondulado	2.5Y 6/3	Ox.	de reoxidación. Límite difuso. Redondeadas. Sin relación con otros caracteres	7.5YR 5/8	5-15	<1	Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. Poco alterado	gf-gm	16-35	Regular	Compacto. Friable	No
2Cz	28/39–54 Sup	Abrupto y plano	7.5YR 7/4	Ox.	No hay				Subredondeado tabular Sin orientación definida. Poco alterado	gf	5-15	Regular	Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico. Friable	No
2Cz	28/39–54 Inf	n.d.	2.5Y 8/3	Ox.-Red.	No hay				n.d.				n.d.	n.d.
3Cgkz	54–160		10YR 6/6	Ox.-Red.	M1: de reoxidación. Límite abrupto. Redondeadas y bandas. Sin relación con otros caracteres. M2: de Red. Límite difuso. Lenguas. Sin relación con otros caracteres	M1: 7.5YR 2.5/1 M2: 5Y 7/4.	M1 y M2: >15	M1y M2: 2-5	Subredondeado tabular Sin orientación definida. Alterados	gf-c	50-70	Regular	Compacto. Adherente. No plástico. Friable	No
GA34 Typic Aquisalid														
Az	0–8/10	Neto y plano	5Y 5.5/2	Red.	No hay				Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. No alterado	gf	1-5	Regular	Poco compacto. Muy friable	No
Cz	8/10–25/30	Abrupto y ondulado	2.5Y 7.5/2	Red.	de Reoxidación. Límite difuso. Sin relación con otros caracteres	2.5YR 7/4	5-15		Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. No alterado	gf	1-5	Regular	Compacto. Friable	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG				Consistencia	Cementación
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol	Distr.		
2Cgkz	25/30-70	Abrupto y plano	10YR 6/6	Ox.-Red.	Bandas en la base. M1: de carbonato, M2: de Red., M3: de reoxidación, M4: de Mn.	M1: 2.5Y 7.5/4 M2: 2.5Y 6/3 M3: 10YR 6.5/6 M4: 10YR 3/1	Todas: 5-15		Partes alteradas. Arenitas rojas: Lajado	gf-gg	20-30		Compacto. Ligeramente adherente. Muy plástico. Friable	No
3Cgz	70-117/120	Abrupto y ondulado	7.5YR 5.5/6. Base: 7.5YR 5/6	Ox.-Red.	n.d.				Poco alterados	gf-gg	50-70		Compacto. Ligeramente adherente. No plástico. Friable	No
3Cgz	70-117/120**		n.d.	n.d.	M1: de Red. Banda en base del canal de arena. M2: de reoxidación del Mn. Irregulares y redondeadas. En base en bandas.	M1: 2.5Y 6/4 M2: 10YR 3/1	M1 y M2: 5-15		n.d.				n.d.	n.d.
3Cgz	70-117/120**		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.
4Cz	117/120-135	Abrupto	5YR 4/6	Ox.	No hay				Poco alterados	gf-gm	50-70		Compacto. Ligeramente adherente. No plástico. Friable	No
GA35 Typic Haploxerept														
Ap1	0-10	Abrupto y plano	2.5Y 5/2	Ox.	No hay				No hay				Poco compacto. Ligeramente duro	No
Ap2	10-20	Abrupto y plano	2.5Y 5.5/3	Ox.	No hay				No hay				Compacto. Ligeramente duro	No
Bw1	20-37	Neto y plano	2.5Y 6/2	Ox.	No hay				No hay				Compacto. Ligeramente duro	No
Bw2	37-70	Abrupto y plano	2.5Y 5/3	Ox.	No hay				No hay				Compacto. Ligeramente duro	No

ANEJO III-2. Descripción macromorfológica sistemática

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
2Aby	70–100	Abrupto y plano	2.5Y 4/2	Ox.-Red.	M1 y M2: de Ox. Irregulares. Sin relación con otros caracteres.	M1: 10YR 4/1 M2: 10YR 7/5	M1 y M2: 2-5	M1 y M2: <1	Cuarzos. No alterados	gf	<1		Compacto. Friable	No
2Cgy1	100–150	Neto y plano	2.5Y 6/6	Ox.-Red.	M1 y M2: de Ox. Irregulares. Sin relación con otros caracteres.	M1: 10YR7/7 M2: 10YR - /6	M1:1-2 y M2: <5	M1: 1-2 M2: <1	No hay				Compacto. Firme	No
2Cgy2	150–210		2.5Y 7/3.5	Ox.-Red.	de Ox. Irregulares. Sin relación con otros caracteres	10YR -/7	>15	2-20	Subangular esferoidal. Sin orientación definida. Cuarzos rosas. No alterados	gf	1-5	Regular	Poco compacto. No adherente. Plástico	No
n.d.	210–250*		Blanco	n.d.	n.d.	naranjas	1-2		Cuarzos rosas		1-5		n.d.	n.d.
n.d.	250–270*		Naranja	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.
n.d.	270–290*		Naranja	n.d.	n.d.						36-50		n.d.	n.d.
n.d.	290–320*		Naranja	n.d.	n.d.				No hay				n.d.	n.d.
n.d.	320–350*		Naranja	n.d.	n.d.					gf			n.d.	n.d.
GA36 Typic Calcixerept														
Ah	0–45	Abrupto y plano	2.5Y 4/2	Ox.	No hay				Subredondeado tabular Sin orientación definida. No alterados.	gf	<1		De poco compacto a compacto. Friable	No
AB	45–57	Neto y plano	2.5Y 5/1	Ox.-Red.	de Ox. Irregular. Asoc. a poros.	10YR 6/6	<1	<1		gf	<1		Compacto. Friable	No
Bwgk	57–80	Neto y plano	10YR 6/4	Ox.-Red.	de Ox de Mn. Irregulares y estelas cualesquiera. Sin relación con otros caracteres.	2.5YR 5/1	2-5	2-20		gf	<1		Compacto. Ligeramente adherente. Plástico. Friable	No
Ck	80–120		10YR 7.5/3	Ox.-Red.	de Ox. Irregular. Sin relación con otros caracteres.	10YR 6/6	2-5	2-20			<1		Compacto. No adherente. No plástico	Muy débilmente cementado. De carbonato. Capa discontinua. Con películas acintadas

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG			Consistencia	Cementación	
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol			Distr.
GA37 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–30	Abrupto y plano	5YR 3.5/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Fragmentos de petrocálcico y cuarcitas. Alterados	gm	5-15	Regular	Compacto. Firme	No
Bk	30–55/65	Abrupto y plano	7.5YR 7/6	Ox.	No hay				Subangular tabular. Con orientación horizontal. Fragmentos de petrocálcico. Alterados	gg-c	16-35	Regular	Muy compacto. Extremadamente firme	Fuertemente cementado. Capa discontinua. Con zonas menos cementadas
Bkm	55/65–75		2.5YR 5/8	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	Fuertemente cementado. Capa discontinua
GA38 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–30	Neto y ondulado	7.5YR 3.5/4	Ox.	No hay				Subredondeado esferoidal y subredondeado tabular. Sin orientación definida. Arenitas y cuarcita armoricana. De poco alterados a alterados	gm-gg	5-15	Regular	Compacto. Ligeramente duro	No
A2	30–35/50	Gradual y ondulado	10YR 3.5/4	Ox.	No hay				Subredondeado tabular. Con orientación horizontal. Arenitas y cuarcita armoricana. De poco alterados a alterados	gm-c	5-15	Regular	Compacto. Friable	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG				Consistencia	Cementación
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol	Distr.		
Bkm	35/50–85/95	Neto y ondulado	7.5YR 7.5/4	Ox.	No hay				Subredondeado tabular. Sin orientación definida. Arenitas y cuarcita armoricana. De alterados a muy alterados	gg-c	50-70	Regular	Extremadamente firme	Fuertemente cementado. De carbonato. Capa continua y brechoide
2Btk	85/95–170		5YR 5/7	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Arenitas y cuarcita armoricana. De alterados a muy alterados	gm-gg	15-35	Regular	Compacto. Firme	No
GA39 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–30	Abrupto y ondulado	7.5YR 4/4	Ox.	No hay				Subredondeado tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas areniscosas. Poco alteradas a alteradas	gf-gm	5-15	Regular	Compacto. Firme	No
Ck	30–47/60	Muy abrupto y plano	7.5YR 4.5/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas areniscosas. Poco alteradas a alteradas	gf-gg	36-50	Regular	Compacto. Friable	No cementado a débilmente cementado
2Ck	47/60– 120/130	Muy abrupto y plano	7.5YR 5/6	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida y algunas con orientación oblicua. Cuarcitas areniscosas y estructuras sedimentarias. Muy alterados	gf-gg	50-70	En bandas	Compacto	No cementado a fuertemente cementado. Carbonato

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
3C	120/130– 170		10YR 4/6	Ox.	No hay				Subangular tabular. Con orientación oblicua. Cuarzitas areniscosas. Poco alteradas a alteradas	gf-c	36-50	Irregular	Compacto	No
GA40 Lithic Xerorthents														
A	0–11/25	Abrupto e irregular	2.5 YR 3.5/4	Ox.	No hay				Subangular esferoidal. Sin orientación definida. Arenitas. Poco alteradas	gf-gm	1-5	Regular	Compacto. Ligeramente duro	No
R	11/25+		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.
GA41 Lithic Calcixerept														
A	0–25	Neto plano	y 7.5YR 4/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzíticas. Poco alteradas	gf-gm	5-15	Regular	Compacto. Duro	No
Bwk	25–45		7.5YR 4/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzíticas. Poco alteradas	gf-gg		Regular	Compacto. Duro	No
R	45+		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	n.d.

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
GA55 Typic Calcixerept														
A1	0–23	Neto y plano	7.5YR 4/2	Ox.	No hay				No hay				Compacto. Firme	No
A2	23–40	Gradual y plano	10YR 4.5/2	Ox.	No hay				Subredondeado tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Poco alterados	gf	<1	Regular	Compacto. Friable	No
2Bgk	40–75	Abrupto y plano	2.5Y 7.5/3	Ox.-Red.	de Ox. Límite difuso. Irregulares. Sin relación con otros caracteres. Incrementándose en la parte Inf. del horiz.	2.5Y 7/8	2-<15	2-20	Subredondeado tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Poco alterados	gf	<1	Regular	Compacto. Friable	No
3Bk	75–95/105	Abrupto y ondulado	10YR 6.5/6	Ox.	No hay				Subredondeado tabular a subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Poco alterados	gf-gm	16-35	Regular	Compacto. Friable	Débilmente cementado. De carbonato. Tipo conglomerático.
4C	95/105–118/127	Neto y ondulado	7.5YR5/8	Ox.-Red.	de Red. Límite neto. Irregulares. Asoc. a las raíces.	5Y6/2	>15	2-20	Subredondeado esferoidal. Paleozoico. De poco alterados a alterados	gf	36-50	En canal (bandas).	Compacto. Friable	No
5Cg	118/127–168		10YR 5/8	Ox.-Red.	M1y M2: de Red. Límite neto. De irregulares a lenguas. Sin relación visible con otros caracteres	M1: 2.5Y 5/4 M2: 5Y 5/3	M1 y M2: >15	M1 y M2: 20-50	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Alterados	gf-gg	36-50		Compacto. Ligeramente adherente. No plástico	No
GA56 Typic Calcixerept														
A	0–35	Neto y plano	2.5Y 5/3	Ox.	No hay				Paleozoico	gf	<1		Compacto. Débil	No
2Bk1	35–85	Neto y plano	2.5Y 6/5	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Estelas verticales. Asoc. a raíces.	7.5 YR 4/6	<2	1-2	Paleozoico	gf	<1		Compacto. Ligeramente duro	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG				Consistencia	Cementación
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol	Distr.		
2Bk2	85–100/105	Neto y ondulado	10YR 6.5/4	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Estelas verticales. Asoc. a raíces.	7.5 YR 4/6	<2	1-2	Paleozoico	gf	<1		Compacto. Ligeramente duro	No
3C	100/105–110/117	Abrupto y ondulado	10YR 6.5/5	Ox.-Red.	M1: de Ox. Límite abrupto. Estelas verticales. Asoc. a raíces. M2: de Red. Límite neto. Irregulares. Sin relación visible con otros caracteres.	M1: 7.5 YR 6/8 M2: 5Y 5.5/2	M1: <2 M2: >15	M1: 1-2. M2: 20-50	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Poco alteradas	gf-gm	16-35	Regular	Compacto.	No
4C1	110/117–135/145	Neto y plano	10YR 5/6	Ox.-Red.	M1 y M2: de Ox. M3: de Red. M1, 2 y 3: Límite neto. Irregulares. Sin relación visible a otros caracteres.	M1: 7.5 YR 6/8 M2: 7.5 YR 2.5/3 M3: 5Y 5.5/2	M1: - M2: <2 M3: 5-15	M1:<1. M2: 1-2. M3:20-50	Subangular tabular. Con orientación oblicua. Paleozoico. Alteradas	gf-gg	36-50	Regular	Compacto. Friable	No
4C2	135/145–170	Neto y ondulado	7.5YR 3.5/4	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Redondeadas. Sin relación visible a otros caracteres.	7.5 YR 6/8	<2	1-2	Subangular tabular. Con orientación oblicua. Paleozoico. Alteradas	gf-gg	36-51	Regular	Compacto. Friable	No
GA57 Sodic Calcixerept														
A	0–22	Neto y plano	2.5Y 6/2	Ox.	No hay				No hay				Compacto. Duro	No
C	22–42	Abrupto y plano	10YR 5.5/2	Ox.-Red.	de Ox. Estelas. Asoc. a poros y raíces. Parte Inf. del horiz.		<1	<2	Paleozoico. Poco alterados.	gf	<1		Compacto. Duro	No
2Bkg	42–80	Neto y plano	10YR 5.5/8	Ox.-Red.	M1: de Ox. 10R 2/1. Límite abrupto. Irregulares. Asoc. a EG. M2: de Red. Límite neto. Lenguas. Sin relación visible con otros caracteres	M1: 10R 2/1. M2: 5Y 6/2	M1: 5-15 y M2: >15	M1 y M2: 2-20	Angular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Poco alterados	gm-gg	36-50	Regular	Compacto. Firme	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
3C	110/120– 135**	Abrupto y plano	m1: 5YR 4/6. m2: 10YR 5/8	Ox.- Red.	de Red. Límite neto. De estelas verticales a lenguas. Sin relación visible con otros caracteres	10YR 6/3	5-15	2-20	Paleozoico	gf	<1		Compacto. Friable	No
2C	80–110/120	Abrupto y ondulado	5YR 4/6	Ox.- Red.	M1: de Ox. Límite abrupto. Irregulares. Asoc. a EG. M2: de Red. Límite neto. Lenguas. Sin relación visible con otros caracteres	M1: 5PB M2: 5Y 6/2	M1: 5- 15 y M2: >15	M1: 1- 2. M2: 2-20	De subredondeado tabular a subangular plano. Sin orientación definida. Paleozoico. De Poco alterados a alterados	gf-gg	36-51	Regular	Compacto. Friable	No
4C	135–205		5YR 4/6	Ox.	No hay				Con orientación horizontal en la parte Sup. Subangular tabular. Paleozoico. Alterados	gf-gm	50-70	Regular	Ligeramente adherente. No plástico	No
GA58 Calcic Aquisalid														
Az	0–4	Neto y plano	10Y 5.5/1	Ox.	No hay				Subangular esferoidal a Subangular Tabular Sin orientación definida. Cuarzos del Paleozoico. Alterados	gf-gg	5-15		Ligeramente duro	No
2Bkz	4–43/48	Abrupto y ondulado	7.5YR 4.5/6	Ox.- Red.	de Ox. Irregulares.	5PR 2/1	5-15	<1	Angular esferoidal a angular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. De poco alt a alterados	gf-gg	36-50	Regular	Firme	No
3Ckz	43/48–85/97	Abrupto y ondulado	5YR 5/7	Ox.- Red.	de Ox. Irregulares y dendriformes. Asoc. a EG.	5PR 2/1	>15	n.d.	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Alterados	gf-c	50-70	Regular	Friable	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
4Cgz	85/97-105	Neto y Plano	10YR 5/8	Ox.-Red.	de Ox. Irregulares y estelas verticales. Sin relación visible a otros caracteres	5PR 2/1	1-5	1-2	Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. Paleozoico	gf	1-5	Regular	Firme	No
5Cz	105-127	Gradual	5YR 4.5/6	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Muy alterados	gf-gg	50-70	Regular	Adherente. No plástico.	No
6Cz	127-180		5YR 5/7	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico. Muy alterados	gf-gg	50-71	Regular	Adherente. No plástico.	No
GA59 Typic Calcixerept														
A	0-20	Abrupto y plano	10YR 5/2	Red.	No hay				No hay				Compacto. Firme	No
Bwg	20-55	Gradual y plano	2.5Y 5/1	Red.	No hay						<1		Compacto. Firme	No
2Bkg	55-100/160	Abrupto y ondulado	10YR 5/8	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Irregulares, dendríformes y pántinas. Asoc. a elementos de estructura, a poros y a EG.	10YR 2.5/1	<5	2-20	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico (cuarcitas del Ordovícico y pizarras). De poco alterados a alterados	gm-gg	16-35	Regular	Compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico	No
3Cg	100/160-190	Abrupto y plano	7.5YR 4.5/6	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Irregulares, dendríformes y pántinas. Asoc. a elementos de estructura, a poros y a EG.	10YR 2.5/1	<5	2-20	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico (cuarcitas del Ordovícico y pizarras). Alterados	gm-c	50-70	Regular	Compacto. Ligeramente adherente. No plástico	No
4Cg	190-200	No visible	5YR 4/6	Ox.-Red.	de Ox. Límite abrupto. Irregulares, dendríformes y pántinas. Asoc. a elementos de estructura, a poros y a EG.	10YR 2.5/1	<5	1-2	Subangular tabular. Sin orientación definida. Paleozoico (cuarcitas del Ordovícico y pizarras). Alterados	gm-c	50-71	Regular	Compacto. Ligeramente adherente. No plástico	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG		Distr.	Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol			
GA61 Petrocalcic Palexeralf														
Ck	0–42/46	SL: Abrupto y ondulado	10YR 7/4 y 7.5YR 6/6	Ox.- Red.	M1 y M2: de Ox. de Fe	M1: 7.5YR 6/8 M2:10YR 4.5/4		M1: 1-2	Redondeado tabular. Sin orientación definida. Cuarzos. Arenitas del Buntsandstein y cuarcitas. No alterados. SL: Subangular tabular. Con orientación subhorizontal en la base del horiz. Arenitas del Buntsandstein y cuarcitas. Alteración original	gf. SL: gg	5-15	Regular	Poco compacto. Ligeramente plástico. Friable	
2 Btk1	42/46–67/74	Neto y ondulado	5YR 5/7	Ox.- Red.	de Ox. de Mn	10YR 2/1		1-2	No hay				Compacto. Ligeramente adherente	
2 Btk2	67/74–120	Difuso y plano	5YR 5/6	Ox.- Red.	de Ox. de Mn	2.5Y 3/1		1-2	No hay				Compacto. Ligeramente adherente. No plástico	
2 Btkm3	120–155		5YR 5.5/6	Ox.- Red.	M1y M2: de Ox. de Mn	M1: 10YR 2/1 M2: 5PB 2.5/1		M1: 1-2	No hay				Compacto. Ligeramente adherente. No plástico	
GA62 Aquic Humixerepts														
Ap	0–28	Neto y plano	2.5Y 5.5/2	Red.	No hay				Redondeado. Sin orientación definida. Cuarzos		<1	Regular	Poco compacto.	No
A	28–43	Muy abrupto y plano	2.5Y 6/2	Red.	No hay				Redondeado. Sin orientación definida. Cuarzos		<1	Regular	Poco compacto.	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
Ckg1	43–65/69	Neto y ondulado	2.5Y 8/1.5	Red.- Ox.	de Ox.-Red. Irregulares. Dist. regular.	7.5YR 5/8	2-5	2-20	Redondeado. Con orientación horizontal. Cuarzo y cuarcitas alterados	gf-gg	1-5	Regular	Poco compacto. Ligeramente adherente. Ligeramente plástico	No
Ckg2	65/69– 90/100	Neto y ondulado	5Y 8/1.5	Red.- Ox.	M1: de Ox.-Red. Irregulares. M2: de Ox.-Red. Irregulares.	M1: 7.5YR 6/4 M2: 10YR 5.5/8	M2:>15	M1 y M2: 20- 50.	Redondeado. Sin orientación definida. Cuarzos y cuarcitas no alterados		<1	Regular	Poco compacto. Ligeramente adherente. De ligeramente plástico a plástico	No
C	90/100–132		7.5YR 6.5/3	Ox.- Red.	de Ox.-Red. Irregulares.	7.5YR 5/8		20-50	Redondeado. Sin orientación definida. Cuarzos y cuarcitas no alterados		<1	Regular	Poco compacto. De ligeramente adherente a adherente. De plástico a muy plástico.	No
GA63 Typic Calcixeroll														
Ap	0–30	Abrupto y plano	10YR 3/3	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas y cuarzos. Alguna caliza. Poco alterados	gf-gm	5-15	Regular	Compacto. Duro	No
Ak	30–45	Abrupto y plano	10YR 4/3	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas y cuarzos. Alguna caliza. Poco alterados	gf-gg	16-35	Regular	Compacto. Ligeramente duro	No
Bk	45–75	Abrupto y plano	7.5YR 7/6 - 5YR 5/8	Ox.	de Ox. Irregular. Sin relación con otros caracteres	2.5YR 5/8	<1	<1	Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas y cuarzos. Alguna caliza. Poco alterados	gf-c	36-50	Regular	Compacto. Muy duro	Débilmente cementado. De carbonato

ANEJO III-2. Descripción macromorfológica sistemática

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			EG			Distr.	Consistencia	Cementación
						Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol			
Btk	75–81/89	Abrupto y ondulado	5YR 5/7	Ox.	de Ox. Pátinas. Asoc. a EG.	2.5YR 2.5/1	1-2	<1	Subangular tabular. Con orientación horizontal. Cuarzitas y cuarzozos. Alguna caliza. Poco alterados	gf-gm	36-50	En capas	Compacto. Suelto	No
2Bk	81/89–120		10YR 7/8	Ox.	de Ox. Irregular. Sin relación con otros caracteres	2.5YR 2.5/2	1-2	<1	Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzitas y cuarzozos. Alguna caliza. Poco alterados	gf-c	36-50	Regular	Compacto. Muy firme	Muy débilmente a débilmente cementado. De carbonato.
GA64 Petrocalcic Palexeroll														
Ap	0–33	Abrupto	7.5YR 3/3	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzitas y cuarzozos. Poco alterados	gf-gg	5-15	Regular	Compacto. Duro	No
Ak	33–33/43	Abrupto y discontinuo	7.5YR 4/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzitas y cuarzozos. Poco alterados	gf-gg	5-15	Regular	Compacto. Ligeramente duro	No
Bkm	33–50/87	Abrupto y discontinuo	7.5YR 6/6	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzitas y cuarzozos. Poco alterados	gm-c	36-50	Regular	Compacto. Muy duro	Débilmente cementado. De carbonato
2Bk	43–82		7.5YR 7/6	Ox.	No hay				Subredondeado esferoidal. Sin orientación definida. Cuarzitas y cuarzozos. Poco alterados	gf	1-5	Regular	Compacto. Firme	No

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior		Color de Matriz	Estado Redox	Tipo	Manchas			Forma	EG			Consistencia	Cementación
							Color	mm	% vol		mm	% vol	Distr.		
GA65 Typic Calcixerept															
Ap	0–35	Neto plano	y	5YR 4/3.5	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzita y cuarzo. Poco alterados	gf-c	16-35	Regular	Poco compacto. Débil	
Bk	35–80			10YR 7/6 - 2.5YR 8/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzita y cuarzo. Poco alterados	gf-c	36-50	Regular	Muy Compacto. Muy duro	Débilmente cementado
GA66 Typic Calcixeroll															
Ap	0–30	Abrupto plano	y	5YR 3/3 - 5YR 4/5	Ox.	No hay				Subangular esferoidal. Sin orientación definida. Cuarzita y cuarzo. Poco alterados	gm-gg	16-35	Regular	Compacto. Firme	No
Bk	30–45/61	Abrupto ondulado	y	7.5YR 2/8	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarzita y cuarzo. Poco alterados	gf-gm	35-50	Regular	Compacto. Suelto	No
2Btssk1	45/61–60/65	Neto ondulado	y	10R 4/3	Ox.- Red.	de Ox. Irregulares. Sin relación visible con otros caracteres	10B 2.5/1	<1	1-2	No hay				Compacto. Friable	No
2Btssk2	60/65–82	Abrupto, irregular y discontinuo	y	2.5YR 6/3	Ox.- Red.	de Ox. Irregulares. Sin relación visible con otros caracteres	5BG 2.5/1	<1	1-2	No hay				Compacto. Friable	No
3Bssk	82–93	Abrupto, irregular y discontinuo	y	10Y 6.5/1	Ox.- Red.	Redondeadas y estelas cualesquiera	2.5YR 6/3	1-2	1-2	No hay				Compacto	No
4Bssk	93–130			10R 6/3.5	Ox.- Red.	Redondeadas y estelas cualesquiera	10Y 6.5/1	5-15	2-20	No hay				Compacto. Friable	No

ANEJO III-2. Descripción macromorfológica sistemática

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG			Consistencia	Cementación	
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol			Distr.
GA67 Pachic Palexeroll														
Ap	0–34/38	Abrupto y ondulado	7.5 YR 3/3	Ox.	No hay				Subredondeado tabular. Sin orientación definida. Cuarцитas ferruginizadas	gm-gg	16-35	Regular	Compacto	No
Bk	34/38–70/75	Abrupto y ondulado	7.5 YR 7/8	Ox.	M1: de Ox. Irregulares. Asoc. a poros o generalizadas. M2:-	M1: 5YR 6/8 M2: negras	M1:<1- 2 M2:<1	20-50	Subangular esferoidal. Sin orientación definida. Cuarцитas y petrocálcicos	gf	<1	Regular	Muy Compacto	Fuertemente cementado
Bkm	70/75–180		10 YR 6/8	Ox.	M1: de Ox. Irregulares. Asoc. a poros o generalizadas. M2: Forma rayas. de Mn	M1: 2.5YR 5/8 M2: negras	M1:<1- 2 M2:<1	2-20	Subangular esferoidal y subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarцитas ferruginizadas y petrocálcicos	gf-gg	1-5	Regular	Muy Compacto. Friable	Fuertemente cementado
2R	180+		n.d.	n.d.	n.d.				n.d.				n.d.	
GA68 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–33	Abrupto y plano	7.5YR 4/4	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarцитas. Poco alteradas	gf-gm	16-35	Regular	Compacto	No
Ckm	33–70/75	Abrupto y plano	7.5YR 8/3	Ox.	No hay				Subredondeado esferoidal y subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarцитas	gm	1-5	Parte Sup horiz.	Muy Compacto	Fuertemente cementado. Continua

AIII-2. Tabla 1. (cont.). Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Límite Inferior	Color de Matriz	Estado Redox	Manchas				EG				Consistencia	Cementación
					Tipo	Color	mm	% vol	Forma	mm	% vol	Distr.		
2Ck1	70/75–93	Abrupto y plano	7.5YR 8/3	Ox.	No hay				Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas. Alteradas	gm	1-5	Regular	Muy Compacto	Muy fuertemente cementado. Fuertemente fragmentado
3Ck2	93–103	Abrupto y plano	7.5YR 6/8	Ox.	de Ox. Irregulares. Asoc. a poros	5YR 5/8	1-2	2-20	Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas. Alteradas	gm	<20	Regular	Muy Compacto	No
4Ck3	103–125		7.5YR 5/8	Ox.	de Ox. Irregulares. Asoc. a poros	5YR 5/8	1-2	2-20	Subangular tabular. Sin orientación definida. Cuarcitas. Alteradas	gm	5-15	Regular	Muy Compacto	No

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica.

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Ac: acumulaciones. Asoc.: Asociación. C: Canto. Dist.: Distribución. E: estructura. EG: Elementos gruesos. Horz.: Horizonte. Inf: Inferior. Long. : longitud. n.d.: No determinado. Prof.: Profundidad. Rev: revestimiento. Sup: Superior. SL: stone line. vol.: Volumen. *Sondeo. **muestras del mismo horizonte

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA19 Typic Aquisalid															
Ag	0–10	Débil	Bloques Subangulares	5-10	Galerías y galerías rellenas. 5-20%	Normal			Revestimientos matriciales. <10%. Asoc. a poros y canales de raíces.	No hay					Óchrico-Sálico
2Cg1	10–25	Débil	Granular prismática	2-5	No hay	Limitado por sustrato salino y encharcamiento			Revestimientos matriciales. <10%. Asoc. a poros	No hay					Sálico
2Cg2	25–90	Débil	Prismática	2-5	No hay	No hay			Revestimientos matriciales. <10%. Asoc. a poros	No hay					
3Cg3	90+	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.					
GA20 Typic Haplosalid															
Ag	0–15	Fuerte	Laminar (y poligonar)	>10	Galerías y galerías rellenas. 1-5%	Muertas en los 3 primeros cm de suelo			No hay	No hay					Óchrico-Sálico
Cg1	15–48	Muy débil	Bloques Subangulares	1-2	No hay	No hay			No hay	No hay					Sálico
2Cg2	48–70	Sin E	De maciza a laminar (y poligonar)	1-2	No hay	No hay			No hay	No hay					
3Cg3	70–107/114	Sin E	De maciza a laminar (y poligonar)	1-2	No hay	No hay			No hay	No hay					
4Cg4	107/114–170	Sin E	De maciza	1-2	No hay	No hay			No hay	No hay					

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura		Actividad biológica	Raíces		Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico	
		Desarrollo	Forma		mm	Aspecto		mm	% vol	Forma	Color		mm
GA21 Aquic Calcixerept													
A	0–16/23	Moderada a fuerte	Bloques Subangulares	1-2	Galerías rellenas	Normal		n.d.	No hay				Óchrico
Bwk	16/23–50	Débil a Moderada	Bloques Subangulares	2-5	Galerías	Limitado por contacto paralítico en la base		No hay	Ac1: Caliza pulverulenta fina. Blanda. Cementadas en la base. Ac2: Cemento geopetal. Revestimientos de EG, de carbonato, duras.		Ac1. Generalizadas. Ac2: 2-5		Cálcico
2Ckg1	50–112/116	Sin E	Maciza		No hay	No hay		No hay	Ac1: Carbonato, cementadas en la base. Pulverulentas. Blandas. Ac2: Cemento geopetal (penden) y rev. de EG.de carbonatos, duras.		Ac1 y 2: 5-15.	A1:-. Ac2: Parte inf. del horiz.	Cálcico
3Ckg2	112/116–150	Sin E	Maciza		No hay	No hay		No hay	Pisolitos ferromangánicos, muy duros, sin asoc. aparente.	2.5YR 3/3.	Generalizadas		
4C	150+	n.d.			n.d.	n.d.		n.d.					

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces		Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico	
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm		% vol	Forma	Color	mm		% vol
GA22 Typic Calcixerept														
Ap	0–38/44	Débil a Moderada	Bloques Subangulares.	1-2	Galerías de lombrices. 1-5%	Normal, en el conjunto del horiz.		No hay	No hay					Óchrico
Bwk	38/44–66/84	E1: Débil E2: Moderada	E1: prismática. E2: Bloques Subangulares.	E1: 2-5 E2: 1-2	Galerías de lombrices. 1-5%	Normal		Revestimientos del material del horiz. disperso, 10-50%, sobre la cara vertical de los agregados y asoc. a poros y canales de raíces	Ac1: Carbonato. Cemento geopetal y revestimientos de EG. Ac2: Caliza pulverulenta.	Ac1: 10YR 4/2		Ac1: 15-20. Ac2: generalizadas		Cálcico
Ck1	66/84–110	Débil	Laminar	2-5	No hay	Limitado por contacto paralítico		No hay	No hay					Cálcico
2C2	110–125*	Sin E			No hay	No hay		No hay	No hay					
3C3	125–155*	Sin E			No hay	No hay		No hay	No hay					
GA23 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–28/31	Ap1: Muy fuerte. Ap2: Fuerte	Ap1: granular compuesta. Ap2: Bloques Subangulares.		No hay	Normal		n.d.	No hay					Óchrico
Bkm1 y Bkm2	28/31–38 y 38–60	Débil	Granular prismática	2-5	No hay	Bwm1:Limitadas por horiz. cementado. Verticales, distr.regular	<1-2	25-200	Corrosión en fragmentos	Costra laminar fragmentada de carbonatos. Muy dura			Generalizadas	Petrocálcico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol.	
GA24 Typic Calcixerept														
Ap1	0–14	Muy fuerte	Bloques Subangulares	>10	No hay	Normal. Verticales.	<1-2	10-25	n.d.	No hay				Óchrico
Ap2	14–29/34	Muy débil	Bloques Subangulares	5-10	Galerías rellenas y turrículas	Normal. Verticales.	<1-2	<10	n.d.	No hay				Óchrico
Ck1	29/34–65/75	Muy fuerte	Bloques Subangulares	<1	No hay	Normal. Verticales.	<1-2	<10		Nódulos de carbonato pulverulento		2-15		Cálcico
2Ck2	65/75–105/110 SL	Sin E por abundancia de EG			No hay	Normal. Limitado por materiales esqueléticos. Verticales		<10	Revestimientos de EG y pendens de carbonatos. Pulverulentas	Nódulos		20-40		Cálcico
3Ck3	105/110 – 135/140 SL	n.d.			No hay	No hay			Revestimientos de EG y pendens de carbonatos. <2%					
4Ck4	135/140 –175	n.d.			No hay	No hay			Revestimientos de EG y pendens de carbonatos. <2%					
5Ck5	175–185	n.d.			n.d.	n.d.			Revestimientos de EG y pendens de carbonatos. <2%					
GA25 Pachic Calcixeroll														
Ap	0–35/40	Moderada	Bloques Subangulares	5-10	No hay	Normal, verticales, distr. regular			n.d.	No hay				Móllico
A	35/40–50/55	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	No hay	Normal, verticales, distr. regular			No hay	Nódulos de carbonato. Blandas.		2-15		Móllico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
Bwk	50/55–100	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	Cámaras y galerías	Normal, verticales, distr. regular			No hay	Carbonato, duras.		5-15	5-15		Cálcico
2C	100–125/135	Sin E	Maciza		No hay	Limitadas por EG			No hay	No hay					
3Ck	125/135–180	Sin E por abundancia de EG			No hay	No hay			No hay	Ac1: Nódulos ferruginosos, mangánicos y cálcicos. Ac2: Pisolitos cálcicos.		Ac1 y 2: 5	Ac1 y 2: <2		
GA26 Pachic Calcixeroll															
Ap	0–29/33	Ap1 y Ap2: Fuerte	Ap1 y Ap2: Bloques Subangulares		Galerías y galerías rellenas	Normal, verticales, distr. Regular	<1-2		No hay	No hay					Móllico
A	29/33–60	Fuerte a muy fuerte	Bloques Subangulares	<1	Cámaras, conchas de gasterópodos y galerías	Normal, verticales, distr. Regular	<1		No hay	No hay					Móllico
Bwk	60–131/136	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	Galerías y galerías rellenas	Afectadas por hidromorfismo.	<1		Carbonatos asociados a galerías de lombriz	Nódulos de carbonato. Duras.			20-40		Cálcico
2Ck	131/136–165	Débil	Laminar	2-5	No hay	No hay			No hay	Nódulos de carbonato friable. Duras.			2-15		
3C	165–180	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.					
GA27 Typic Haplosalid															
Ayz	0–12	Fuerte	Granular compuesta	1-2	Galerías y turriculas	Normal	<1-2	25-200	No hay	Cristales de yeso			<2		Óchrico
2C	12–84/90		Maciza		Galerías	Normal.	<1-2	10-25	No hay	No hay					Sálico
3C	84/90–115/120		Maciza		No hay	Limitadas por contacto lítico	<10		No hay	No hay					Óchrico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces		Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico		
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm		% vol	Forma	Color	mm		% vol	Distribución
4C	115/120 –170		Maciza		No hay	Limitadas por contacto lítico		<10	No hay	No hay					
GA28 Gypsic Aquisalid															
Aygz	0–6/10		Maciza		n.d.			<10	No hay	Cristales de yeso			2-5		Sálico
Cyg1	6/10–14/16	Moderada	Laminar	5-10	Galerías de raíces. 1-5%.			<10	No hay	Cristales de yeso			2-5		Sálico
Cyg2	14/16–24	Muy débil	Laminar	>10. Localmente: 1-2	Galerías de raíces. <1%			<10	Revestimientos matriciales en las caras de grietas. <5%	Ac1: bandas yeso rosa. Ac2: carbonato. Ac3: cristales lenticulares de yeso		Ac1: 1. Ac3: mm		Ac1: Base horiz., Ac2: en la Sup. de sets sedimentarios y otros lugares	Sálico
2Cyg3	24–42	Débil	Maciza		Galerías de raíces. <1%			<10	Revestimientos en las galerías verticales	Cristales de yeso			10-20		Sálico-Gypsico
2Cyg4	42–90 90–106*	Muy débil	Bloques Subangulares. Sondeo: maciza y laminar	5-10	Galerías, 20-50%, Turriculas, tubos de raíz, pelos radiculares carbonatados			<10	No hay	Microcristales de yeso en fango carbonático. Yeso en cristales aislados y pequeños nódulos			2-5 y en sondeo de 5-20		Sálico-Gypsico
3Cyg5	106–110*		Maciza		n.d.	No hay			No hay	Cristales de yeso			20-40	Amasijo	
4Cyg6	110–115*		Maciza		n.d.	No hay			No hay	Cristales de yeso			5-20		
5Cy1	115–148*		Maciza y laminar		n.d.	No hay			No hay	Cristales de yeso			5-21		
6Cy2	148–160*		Maciza		n.d.	No hay			No hay	Cristales de yeso.			2-20		Sálico
7C	160–185*	n.d.			n.d.	No hay			n.d.	No hay					Sálico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA29 Gypsic Aquisalid															
Aygz	0–6/8		Maciza a sublaminar		Galerías. <1%			<10	No hay	Cristales de yeso			<2		Óchríco
2Cyg1	6/8–24	Débil	Laminar y macizo	5-10	Galerías. <1%			<10	Revestimientos matriciales. <10%	Cristales de yeso romboidales, hexagonales			2-5 y en la parte Inf. 5-10		Gypsic-Sálico
3Cyg2	24– 80	Muy débil	Maciza y Bloques Subangulares	5-10	Galerías. 5-20%			<10	Revestimientos matriciales. <10%	Cristales de yeso			5-10		Gypsic-Sálico
4Cyg3	80–110*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.					Sálico
5Cg	110–140*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.					
6Cg	140–170*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						
GA33 Typic Aquisalid															
Az	0–21	Fuerte	Bloques Subangulares	<1	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. Regular. Vivas. No hay > 10 mm	<1	25-200	No hay	Cristales de yeso			<2		Óchríco
Cz	21–28/39	Débil	Bloques Subangulares	1-2 a 2-5	De fauna. No aparente	No hay			No hay	No hay					
2Cz	28/39–54 Sup	Sin E	Maciza y fragmental		De fauna. No aparente	No hay			No hay	No hay					Sálico
2Cz	28/39–54 Inf	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.					
3Cgkz	54–160	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	No hay			No hay	Nódulos y bandas de carbonato. Blandas. Continuas	10YR 5/8	15	<2		Sálico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	
GA34 Typic Aquisalid														
Az	0–8/10	Débil	Bloques Subangulares	1-2	Galerías verticales de fauna. 5-15%	Afectado por hidromorfismo. Limitado por sustrato salino. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10 mm	<1	<10	No hay	No hay				Óchrico
Cz	8/10–25/30	Sin E por abundancia de EG	Maciza		Galerías de fauna verticales y galerías rellenas. 5-15%		<1	<10	No hay	No hay				
2Cgkz	25/30–70	Muy débil	Bloques Subangulares		Galerías. 1-5%	No hay			No hay	Sup: Nódulos de carbonato. Blandas. Continuas. Inf: Nódulos y en bandas de carbonato. Blandas. Discontinuas	Sup: >15. Inf: <5	Sup: 2-5. Inf: <2		Sálico
3Cgz	70–117/120	Sin E por abundancia de EG			No hay	n.d.			n.d.	No hay				
3Cgz	70–117/120**	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.				Sálico
3Cgz	70–117/120**	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	n.d.				
4Cz	117/120–135	Sin E por abundancia de EG			No hay	No hay			No hay	No hay				

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA35 Typic Haploxerept															
Ap1	0–10	Fuerte	Granular	5-10	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. Pocas raíces > 10 mm. Horizontales y vivas.	<1-2	>200	No hay	No hay					Óchrico
Ap2	10–20	Fuerte	Granular	1-2 y 5-10	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. Pocas raíces > 10 mm. Horizontales y vivas.	<1-2	<10	No hay	No hay					Óchrico
Bw1	20–37	Débil	Bloques Subangulares	5-10	Galerías de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-2	<10	No hay	No hay					
Bw2	37–70	E1 y E2: Débil	E1: prismática. E2: Bloques Subangulares	2-5	Galerías de fauna. 5-20%. Galerías rellenas 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-5	<10	No hay	Cristales de yeso		<5	<1		
2Aby	70–100	Sin E	Maciza		Galerías de fauna. 5-20%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-2	<10	No hay	Nódulos friables, de cristales de yeso.		<5	<2		
2Cgy1	100–150	Sin E	Maciza		Galerías de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-5	<10	No hay	Nódulos friables, de cristales de yeso			<2		
2Cgy2	150–210	Sin E	Maciza		Galerías de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-5	<10	No hay	Nódulos friables, de cristales de yeso			<2		
n.d.	210–250*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.	Cristales de yeso					
n.d.	250–270*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						
n.d.	270–290*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						
n.d.	290–320*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						
n.d.	320–350*	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA36 Typic Calcixerept															
Ah	0–45	E1: Fuerte. E2: Muy fuerte	E1: Bloques Subangulares a granular. E2: Granular	e1: 1-2 y E2: <1	Turriculas de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10 mm	<1-2	25-200	n.d.	No hay					Óchrico
AB	45–57		Bloques Subangulares	2-5	Turriculas de fauna. Galerías rellenas. >20%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1	10-25	Revestimientos matriciales <10. Asoc. a caras de elementos estructurales, y a poros y canales de raíces.	Nódulos de carbonato. Blandas		5-15	20-40		Óchrico-Cámbico
Bwgk	57–80	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	Galerías de fauna <1%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	<10	Revestimientos matriciales <10%.Asoc. a caras de elementos estructurales, y a poros y canales de raíces	Nódulos de carbonato. Blandas	10YR 8/2	<5	5-20		Cálcico
Ck	80–120	Sin E	Laminar	2-5	De fauna. No aparente	Limitado por el material esquelético. No hay raíces >10mm			n.d.	Nódulos y bandas de carbonato. De ligeramente duras a duras	10YR 8/2	5-15	Generalizadas		Cálcico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	
GA37 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–30	Moderada	Bloques Subangulares	1-2 a 2-5	No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas por fin de ciclo. No hay raíces >10mm	<1-5	20-25	No hay	No hay				Óchrico
Bk	30–55/65	Sin E por abundancia de EG			No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas por fin de ciclo. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	Ac1: Nódulos y pendens. Ligeramente duras y muy duras. Discontinuas. Ac2: Cristales, y caliza pulverulenta. Duras	A1:-. Ac2: 7.5YR 7/6	Ac1: 20-40. Ac2: generalizadas		Cálcico
Bkm	55/65–75	n.d.			n.d.	n.d.			No hay	Costra de carbonato. Ligeramente duras, y muy duras. Continuas	7.5YR 7/3	Generalizadas		Petrocálcico
GA38 Petrocalcic Calcixerept														
Ap	0–30	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas por fin de ciclo. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	No hay	No hay				Óchrico
A2	30–35/50	Moderada	Bloques Subangulares	2-5 y 5-10	No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Muertas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	No hay				Óchrico
Bkm	35/50–85/95	n.d.			Hormigueros hipogeos <1%	Limitado por horizonte cementado			No hay	Generalizadas. Costras cementadas de carbonato. Continuas	7.5YR 7/3	Generalizadas		Petrocálcico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
2Btk	85/95–170	Sin E			No aparente	n.d.			Cutanes de presión <10%. Asoc. a caras de elementos estructurales y a granos de arena. Revestimientos de EG	Nódulos y costras de carbonato. Rizocrecciones. Subverticales. Duras. Caliza pulverulenta	5YR5.5/3	Ac1: diámetro:10-30 y long: 50-100			Cálcico
GA39 Petrocalcic Calcixerept															
Ap	0–30	Moderada	Bloques Subangulares	5-10	No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	25-200	No hay	Nódulos friables de carbonato. Blandos. Discontinuos. Revestimientos de EG		<5	2-20	Asoc.a elementos esqueléticos	Óchrico
Ck	30–47/60	Débil	Bloques Subangulares	2-5	n.d.	Normal. Verticales. Distr. regular. Muertas por fin de ciclo.	<1-2	10-25	No hay	Nódulos friables. Revestimientos de EG. Encostramiento de carbonato. Blandos y ligeramente duros. Continuos		<5-15	>40%	Asoc. a elementos esqueléticos	Cálcico
2Ck	47/60–120/130 Sup	Sin E por abundancia de EG			n.d.	n.d.			No hay	Nódulos friables y pendens. Enrejado. Revestimientos de carbonato. Ligeramente duros y duros. Continuos	10YR 8/2.5	<5	<40	Asoc. a elementos esqueléticos	

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
3C	120/130–170	Sin E por abundancia de EG			n.d.	n.d.			No hay	Nódulos friables. Revestimientos de EG. Encostramiento de carbonato. Ligeramente duras y muy duras. Discontinuos	10YR 8/2.6	<5	20-40	Asoc. a elementos esqueléticos	
GA40 Lithic Xerorthents															
A	0–11/25	Fuerte	Granular	1-2	Galerías de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-5	<10	No hay	No hay					Óchríco
R	11/25+	n.d.			n.d.	Limitado por contacto lítico			n.d.						
GA41 Lithic Calcixerept															
A	0–25	Fuerte	Bloques Subangulares	1-2 a 2-5	Turrículas de fauna. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	No hay						Óchríco
Bwk	25–45	Moderada	Bloques Subangulares	1-2	n.d.	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm		<10	No hay	Nódulos, revestimientos de elementos y cemento geopetal. De carbonato. Blandas y ligeramente duras		5-15	>5		Cálcico
R	45+	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA55 Typic Calcixerept															
A1	0–23	Muy fuerte	Granular compuesta	5-10 y >10	De fauna. No aparente	Normal	<1-2	>200	n.d.	No hay					Óchrico
A2	23–40	De débil a Moderada	Prismática	2-5	De fauna. No aparente	Normal	<1-2	25-200	n.d.	No hay					Óchrico
2Bgk	40–75	Débil	Bloques Subangulares	1-2 a 2-5	De fauna. No aparente	Normal	<1-2	10-25	n.d.	Nódulos hacia rizocrecciones de carbonato. Blandas	7.5YR 8/2		>40%	En canales de raíces y poros	Cálcico
3Bk	75–95/105	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Normal	<1-2	10-25	n.d.	Ac1: Nódulos y revestimientos de EG. de carbonato. Ac2: Costra de carbonato, Duras.	Ac1: 10YR 8/3.5 Ac2: 2.5Y 8/2		Ac1: 5-20. Ac2: generalizadas	Ac1: Asoc. a elementos del esqueleto. Ac2: en la base del horiz.	Cálcico
4C	95/105–118/127	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitado por el material esquelético			n.d.	Bandas mangánicas	5PB 2.5/1		<2		
5Cg	118/127–168	Muy fuerte		5-10 y >10	De fauna. No aparente	Limitado por material esquelético			n.d.	No hay					
GA56 Typic Calcixerept															
A	0–35	Moderada			Galerías de fauna y galerías rellenas. <1%.	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	No hay					Óchrico
2Bk1	35–85	Sin E			Galerías de fauna y galerías rellenas <1%.	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	Nódulos friables de carbonato. Elongado. Vertical. Blandas.	2.5Y 7/4	>15	5-20		Cálcico
2Bk2	85–100/105	Sin E			De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	No hay	Revestimientos de carbonato. Ligeramente duras	2.5Y 7/4	>15	Generalizadas		Cálcico

ANEJO III-2. Descripción macromorfológica sistemática

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
3C	100/105–110/117	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitadas por el material esquelético			No hay	De carbonato. Ligeramente duras	2.5Y 7/4		5-20	Asoc. a elementos del esqueleto.	
4C1	110/117–135/145	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitadas por el material esquelético			No hay	Nódulos y revestimientos de carbonato.	10Y 6.5/3		5-20		
4C2	135/145–170	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitadas por el material esquelético			No hay	Nódulos y revestimientos de carbonato	2.5Y 5/6		5-20		
GA57 Sodic Calcixerept															
A	0–22	Moderada	Bloques Subangulares	2-5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	De yeso. Vermiformes. Blandas	Blanco		<2	En canales de raíces. Base del horiz.	Ochríco
C	22–42	Sin E	Maciza		Galerías centimétrica s. 1-5%	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1	10-25	No hay	Ac1: De yeso. Vermiformes. Blandas. Ac2: Nódulos friables de carbonato	Blanco		Ac1 y 2:<2	Ac1: Parte Sup. del horiz.	Cálcico
2Bkg	42–80	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	n.d.			No hay	Ac1: De carbonato. Banda o canal. Blandas. Discontinuas. Ac2: De carbonato. Nódulos y revestimientos EG. Blandas.	Ac1: 10YR 8/3. Ac2: 10YR 5.5/8		Ac1: 5-20. Ac2: generalizadas	Ac1: Base del horiz. Ac2: Por todo el horiz.	Cálcico
2C	80–110/120	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	n.d.			No hay	Revestimientos de carbonato de EG. Blandas. Discontinuas	10YR 8/4		5-20	Asoc. a elementos del esqueleto	Cálcico
3C	110/120–135**	Sin E	Laminar	2-5	De fauna. No aparente	n.d.			No hay	No hay					

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
4C	135–205	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	n.d.			No hay	No hay					
GA58 Calcic Aquisalid															
Az	0–4	Moderada			De fauna. No aparente	No hay			No hay	No hay					Óchrico
2Bkz	4–43/48	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	No hay			No hay	Cemento geopetal. Blandas.	2.5Y 8/4		Generalizadas	Eflorescencias de carbonato en superficie. Asoc. a elementos del esqueleto.	Cálcico
3Ckz	43/48–85/97	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitado por el material esquelético.			No hay	Cristales de sales más solubles que el yeso			<2		
4Cgz	85/97–105	Sin E			De fauna. No aparente	No hay			No hay	Cristales de sales más solubles que el yeso			<2		
5Cz	105–127	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	No hay			No hay	Cristales de sales más solubles que el yeso			<2		
6Cz	127–180	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	No hay			No hay	No hay					
GA59 Typic Calcixerept															
A	0–20	E1: Moderada E2: Sin E	E1: Granular Compuesta. E2: Maciza.	E1: 2-5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Dist. Regular. Vivas. No hay raíces>10mm	<1-2	25-200	n.d.						Óchrico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
Bwg	20–55	E1: Moderada E2: Sin E	E1: Bloques Subangulares. E2: Laminar y maciza	E1: 5-10. E2: 1-2	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Dist. Regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	n.d.						Cálcico
2Bkg	55–100/160	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitado por material esquelético. No hay raíces >10mm			Cutanes de presión en EG. 10-50%. 10Y 7/1. Revestimientos matriciales. <10%. Sobre la cara vertical de agregados, y asociados a poros y EG.	Ac1: Nódulos e interestratificaciones. Bandas de carbonato. Ac 2: cemento geopetal y revestimientos de carbonato	Ac1: 10YR 8/3.5	Ac1: 20-40. Ac2: <2		Ac1: -. Ac2: Asoc. a elementos del esqueleto	
3Cg	100/160–190	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitado por el material esquelético. No hay raíces >10mm			Cutanes de presión en EG. 10-50%						
4Cg	190–200	Sin E por abundancia de EG			De fauna. No aparente	Limitado por el material esquelético y capa freática salina. No hay raíces >10mm			n.d.						

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA61 Petrocalcic Palexeralf															
Ck	0–42/46	Muy débil	Laminar	5-10	n.d.	No hay			No hay	Dispersas impregnativa de carbonato			20-40	Base del horiz. y en la parte central del horiz.	Óchrico
2 Btk1	42/46–67/74	Muy fuerte	Lenticular	1-2	n.d.	No hay			Cutanes arcillosos. Slikensides <10% y Revestimientos 50-80%. Asoc. a caras de elementos estructurales	Ac1: Nódulos de carbonato. Duras. Ac2: Rizocreciones coalescentes de carbonato.	Ac1: 7.5YR 7/8. Ac2: 7.5 YR 8/6		Ac1: 20-40. Ac2: <2	Ac1 y 2: Por todo el Horiz.	Argílico ó cálcico
2 Btk2	67/74–120	Moderada	Bloques angulares	1-2	n.d.	No hay			Cutanes arcillosos. Slikensides <10% y Revestimientos 50-80%. Asoc. a caras de elementos estructurales	Nódulos y rizocreciones de carbonato. Duras.	7.5YR 8/5		>40		Argílico ó cálcico
2 Btkm3	120–155	Moderada	Lenticular	1-2	n.d.	No hay			Cutanes arcillosos. Slikensides <10% y Revestimientos 50-80%. Asoc. a caras de elementos estructurales	Rizocreciones coalescentes de carbonato	Color exterior: 10YR 2/1, color interior: 7.5YR 7.5/6		>40		Argílico ó petrocálcico
GA62 Aquic Humixerepts															
Ap	0–28	Fuerte	Bloques Subangulares	2-5	De fauna. No aparente	Normal. 10-25 raíces. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	n.d.	Nódulos de carbonato. Blandas			<2	Por todo el horiz.	Óchrico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
A	28-43	E1: Moderada Yuxtapuesta: Débil	E1: Bloques Subangulares. Yuxtapuesta: Laminar	E1: 2-5. Yuxtapuesta: 1-2	De fauna. No aparente	Normal. Afectado por hidromorfismo. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1-2	10-25	n.d.	Nódulos de carbonato. Blandas			<2	Por todo el horiz.	Óchrico
Ckg1	43-65/69	Moderada	Laminar	1-2	No aparente	Normal. Afectado por hidromorfismo. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	10-25	n.d.	Ac1: Nódulos y revestimientos de los EG. De carbonato. Ligeramente duras. Continuas. Ac 2: Nódulos ferromangánicos y de carbonato. Muy duras		Ac 2: 5-15	Ac1: generalizadas. Ac2: 2-20	Ac1: Horiz. de ac.	Cálcico
Ckg2	65/69-90/100	E1 y Yuxtapuesta: Moderada	E1: Bloques Subangulares y laminares. Yuxtapuesta: Laminar	E1: 1-2. Yuxtapuesta: 2-5	No aparente	Normal. Afectado por hidromorfismo. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	10-25	n.d.	Ac1: Nódulos y revestimientos de los EG. De carbonato. Ligeramente duras. Continuas. Ac 2: Nódulos ferromangánicos y de carbonato. Muy duras		Ac 2: 5-15	Ac1: generalizadas. Ac2: 2-21	Ac1: Horiz. de acumulación	Cálcico
C	90/100-132	E1 y Yuxtapuesta: Moderada	E1: Bloques Subangulares y laminares. Yuxtapuesta: Laminar	E1: 1-2. Yuxtapuesta: 2-5	De fauna. Oquedades. 1-15%. Muchos poros	Normal. Afectado por hidromorfismo. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	1-10	n.d.						

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	
GA63 Typic Calcixeroll														
Ap	0–30	E1 y E2: Fuerte	E1y2: Granular	E1: <10. E2: 2- 5	De fauna. No aparente	Normal. . Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces>10mm	<1-2	10-25	n.d.					Móllico
Ak	30–45	E1 y E2: Fuerte	E1y2: Granular Compuesto	E1: <10. E2: 2- 5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1-2	1-10	n.d.	Revestimiento de carbonato			2-5	Óchrico
Bk	45–75	Sin E			De fauna. No aparente	Limitado por horizonte cementado. Verticales. Muertas. No hay raíces >10mm	<1-2	>10	Cutanes arcillosos. <10%. En bolsada.	Cemento geopetal. De carbonato			Generaliza- das	Cálcico
Btk	75–81/89	Sin E	Granular simple		De fauna. No aparente	Normal.		25-200	Cutanes arcillosos. Continuos	Cemento geopetal			2-5%	Cálcico
2Bk	81/89–120	Sin E			De fauna. No aparente	Limitado por horizonte cementado.			Cutanes arcillosos. 10-50%. En bolsadas	Caliza pulverulenta			Generaliza- das	

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones				Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	
GA64 Petrocalcic Palexeroll														
Ap	0–33	Fuerte	Granular Compuesto	1-2 y 2-5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	25-200	No hay	No hay				Móllico
Ak	33–33/43	Fuerte	Granular Compuesto	1-2 y 2-5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas y muertas. No hay raíces >10mm	<1	1-10	No hay					Óchrico
Bkm	33–50/87	Sin E			De fauna. No aparente	n.d.			No hay	Cemento geopetal. Caliza pulverulenta y revestimientos			Generaliza- das	Petrocálcico
2Bk	43–82	Sin E	Maciza		De fauna. No aparente	n.d.			No hay	Caliza pulverulenta				Cálcico
GA65 Typic Calcixerept														
Ap	0–35	Fuerte	Granular compuesto	1-2 y 2-5	De fauna. No aparente	Normal. Verticales. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-5	25-200	n.d.	No hay				Óchrico
Bk	35–80	Sin E			n.d.	Limitado horizonte por cementación. No hay raíces >10mm			Cutanes arcillosos <10%. Bandas arenosas	Cemento geopetal. Bandas y revestimientos de carbonato. Ligeramente duras			Generaliza- das	Cálcico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA66 Typic Calcixeroll															
Ap	0–30	Moderada	Bloques Subangulares	2-5 y 5-10	n.d.	Normal. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	n.d.	No hay					Móllico
Bk	30–45/61	Sin E por abundancia de EG			n.d.	Normal. No hay raíces >10mm	<1-2	1-10	n.d.	Nódulos, cemento geopetal y revestimientos de carbonato. Ligeramente duros y duros			Generalizadas		Cálcico
2Btssk1	45/61–60/65	Sin E			Galerías de raíces. 1-5%	Normal. No hay raíces >10mm	<1-2	<10	Superficie 1: cutanes arcillosos. Continuos. Revestimientos generalizados. Superficie 2: slickensides. <10%. Revestimientos generalizados	Nódulos y cristales de carbonato. Blandas			2-5%.		Cálcico
2Btssk2	60/65–82	Sin E			Galerías de raíces. 5-20%	Normal. No hay raíces >10mm	<1-2	<10	Superficie 1: cutanes arcillosos. 50-80%. Revestimientos generalizados. Superficie 2: slickensides. 10-50%. Revestimientos generalizados	Nódulos, cristales, en bandas de carbonato. Blandas			5-20%		Cálcico

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
3Bssk	82-93	Sin E			Galerías de raíces. 1-5%	Normal. No hay raíces >10mm	<1-2	<10	Superficie 1: cutanes arcillosos. Posibles. Superficie 2: slickensides. 10-50%. Revestimientos generalizados	Bandas y caliza pulverulenta. Blandas			5-20%		Cálcico
4Bssk	93-130	Sin E			n.d.	Normal. No hay raíces >10mm	<1-2	<10	Superficie 2: slickensides. 50-80%. Revestimientos generalizados	Nódulos de carbonato. Blandas			<2		Cámbico
GA67 Pachic Palexeroll															
Ap	0-34/38	De moderada a fuerte	Bloques Subangulares	5-10	No hay	Normal. Orientación vertical. Distr. regular. Vivas. No hay raíces >10mm	<1-2	25-200	No hay	No hay					Móllico
Bk	34/38-70/75	No visible por petrocálcico			No hay	Muertas. Verticales. Distr. regular. No hay raíces >10mm	<1		No hay	Nódulos, bandas, columnar, capa acintada, tobáceos. De carbonato. Muy duras y fragmentadas	10YR 8/2		Generalizadas	Horiz. de ac.	Cálcico
Bkm	70/75-180	No visible por petrocálcico			No hay	n.d.			No hay	Nódulos, bandas, columnar, capa acintada, tobáceos. De carbonato. Muy duras y fragmentadas.	10YR 8.5/1 y 2.5Y 8/2		Generalizadas	Horiz. de ac.	Petrocálcico
2R	180+	n.d.			n.d.	n.d.			n.d.						

AIII-2. Tabla 2. Descripción macromorfológica de los perfiles del suelo de la Laguna de Gallocanta.

Horiz.	Prof. cm	Estructura			Actividad biológica	Raíces			Estudio de superficies	Acumulaciones					Horiz. diagnóstico
		Desarrollo	Forma	mm		Aspecto	mm	% vol		Forma	Color	mm	% vol	Distribución	
GA68 Petrocalcic Calcixerept															
Ap	0–33	Fuerte	Bloques Subangulares	5-10	No hay	Normal. Limitado por contacto lítico. Verticales. Distr. regular. Vivas. Muertas por fin de ciclo. No hay raíces >10mm	<1-2	25- 200	No hay	No hay					Óchrico
Ckm	33– 70/75	n.d.			No hay	n.d.			No hay	de carbonato			Generalizadas	Horiz. de ac.	Petrocálcico
2Ck1	70/75– 93	n.d.			No hay	n.d.			No hay	de carbonato			Generalizadas	Horiz. de ac.	Cálcico
3Ck2	93–103	n.d.			No hay	n.d.			No hay	Nódulos de carbonato. Cemento geopetal. Pulverulentas. Duras.		<5	Generalizadas	Horiz. De ac.	
4Ck3	103–125	Sin E			No hay	n.d.			No hay	Nódulos. Cemento geopetal. Pulverulentas. Duras.		<5	Generalizadas	Horiz. de ac.	

ANEJO IV.

Datos analíticos de las muestras de suelo

En este anejo quedan recogidos en la Tabla 1 los datos físico-químicos de las muestras de tierra fina de cada uno de los horizontes de los suelos.

Los datos analíticos que se recogen en la tabla son los siguientes:

Perfil del suelo y nombre del horizonte

Profundidad en cm

Conductividad eléctrica del extracto suelo:agua 1:5

Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada

pH de la pasta

Porcentaje de saturación

Contenido en porcentaje de:

Carbonato cálcico equivalente

Yeso

Materia orgánica

Elementos gruesos (>2mm)

Contenido en porcentaje de:

Arena

Limo

Arcilla

Clase textural USDA

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

n.d.: No determinado. CE1:5: Conductividad eléctrica del extracto suelo:agua 1:5. CEe: Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada. pHp: pH de la pasta. PS: Porcentaje de saturación. CCE: Carbonato cálcico equivalente. MO: Materia orgánica. EG: Elementos gruesos (>2mm). *Sondeo. **muestras del mismo horizonte

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE	Yeso	MO	EG	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural USDA
						%	%		% vol		%		
GA19 Typic Aquisalid													
Ag	0–10	9.4	67.7	8.3	47	38	4.4	0.8	1	61.2	18.5	20.4	Franco arcillo arenosa
2Cg1	10–25	8.3	39.3	8.1	89	59	3.8	0.5	0	14.1	49.0	36.9	Franco arcillo limosa
2Cg2	25–90	4.0	25.7	8.1	60	70	2.2	0.5	0	23.6	33.3	43.1	Arcillosa
3Cg3	90+	2.7	16.7	8.1	67	50	1.6	0.3	7	12.5	12.5	75.0	Arcillosa
GA20 Typic Haplosalid													
Ag	0–15	8.1	51.9	8.3	56	40	3.4	1.0	1	55.7	25.4	18.8	Franco arenosa
Cg1	15–48	3.3	21.1	8.2	67	49	1.9	0.3	5	46.1	8.5	45.4	Arcillo arenosa
2Cg2	48–70	2.4	23.7	8.1	40	51	1.0	0.2	3	53.1	0.7	46.2	Arcillo arenosa
3Cg3	70–107/114	2.4	25.3	8.1	39	38	0.9	0.2	21	55.5	9.7	34.8	Franco arcillo arenosa
4Cg4	107/114–170	2.7	27.7	8.3	37	61	0.8	0.1	9	47.0	4.1	48.9	Arcillo arenosa
GA21 Aquic Calcixerept													
A	0–16/23	0.4	3.4	8.1	45	34	1.9	2.1	2	74.6	19.4	6.0	Franco arenosa
Bwk	16/23–50	0.2	0.9	8.3	40	56	0.0	0.7	29	59.4	11.9	28.7	Franco arcillo arenosa
2Ckg1	50–112/116	0.1	0.4	8.5	23	21	0.0	0.1	33	88.8	10.5	0.7	Arenosa
3Ckg2	112/116–150	0.1	0.9	8.2	61	72	0.0	0.1	9	31.3	19.5	49.2	Arcillosa
4C	150+	0.1	0.5	8.2	64	3	0.0	0.0	8	51.0	34.7	14.3	Franca
GA22 Typic Calcixerept													
Ap	0–38/44	0.3	1.7	8.3	52	44	2.3	2.2	37	53.4	30.6	16.0	Franco arenosa
Bwk	38/44–66/84	0.1	0.6	8.3	30	44	0.0	0.6	51	87.9	9.8	2.3	Arenosa
Ck1	66/84–110	0.1	0.6	8.2	27	46	0.0	0.4	56	94.8	4.2	1.0	Arenosa
2C2	110–125*	0.1	0.7	8.3	45	48	0.0	0.2	33	68.9	15.2	15.9	Franco arenosa
3C3	125–155*	0.1	0.5	8.3	53	36	0.0	0.1	n.d.	40.3	33.1	26.6	Franca

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE %	Yeso %	MO	EG % vol	Arena %	Limo %	Arcilla	Clase Textural USDA
GA23 Petrocalcic Calcixerept													
Ap	0–28/31	0.2	0.5	8.3	47	23	3.2	3.7	35	72.8	22.5	4.7	Franco arenosa
GA24 Typic Calcixerept													
Ap (1 y 2)	0–29/34	0.2	0.3	8.1	42	13	3.2	1.6	5	55.5	30.6	14.0	Franco arenosa
Ck1	29/34–65/75	0.2	0.4	8.1	49	36	2.3	0.8	1	42.8	32.5	24.7	Franca
2Ck2	65/75–105/110	0.2	0.7	8.3	28	28	1.1	0.2	30	84.5	12.9	2.6	Arenosa franca
3Ck3	105/110–135/140	0.1	0.7	8.3	12	32	0.0	0.1	53	96.4	3.5	0.2	Arenosa
GA25 Pachic Calcixeroll													
Ap	0–35/40	0.3	1.1	8.2	47	26	3.2	3.2	7	60.4	29.8	9.8	Franco arenosa
A	35/40–50/55	0.3	0.9	8.5	45	44	2.6	1.7	6	55.2	24.9	19.9	Franco arenosa
Bwk	50/55–100	0.2	0.4	8.5	51	50	3.1	0.6	10	40.5	25.5	34.0	Franco arcillosa
2C	100–125/135	0.1	0.3	8.5	8	31	0.0	0.2	49	85.6	11.0	3.4	Arenosa franca
3Ck	125/135–180	0.1	0.4	8.1	33	39	1.2	0.2	33	66.6	25.9	7.5	Franco arenosa
GA26 Pachic Calcixeroll													
Ap	0–29/33	0.2	0.6	8.3	50	27	3.3	2.4	3	60.8	30.0	9.1	Franco arenosa
A	29/33–60	0.3	0.9	8.7	63	34	3.1	1.3	1	31.9	27.5	40.6	Arcillosa
Bwk	60–131/136	0.2	0.5	8.5	50	63	0.0	0.4	1	44.3	18.8	36.9	Franco arcillosa
2Ck	131/136–165	0.3	0.4	8.4	34	25	0.0	0.1	6	68.9	21.9	9.3	Franco arenosa
GA27 Typic Haplosalid													
Ayz	0–12	3.7	17.8	7.8	43	37	3.7	2.0	1	72.5	18.4	9.1	Franco arenosa
2C	12–84/90	4.7	37.3	7.8	35	53	3.9	0.6	0	41.7	25.3	33.0	Franco arcillosa
3C	84/90–115/120	2.0	21.2	8.2	35	13	1.2	0.1	10	75.5	16.6	7.8	Franco arenosa
4C	115/120–170	3.5	17.8	8.1	58	35	2.6	0.1	10	35.6	25.6	38.8	Franco arcillosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE	Yeso	MO	EG	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural USDA
						%	%	% vol		%	%		
GA28 Gypsic Aquisalid													
Aygz	0–6/10	65.8	182.3	7.9	54	18	27.1	5.8	0	79.8	15.5	4.7	Arenosa franca
Cyg1	6/10–14/16	36.2	145.5	8.5	74	29	14.5	6.2	0	62.4	25.1	12.4	Franco arenosa
Cyg2	14/16–24	23.7	104.6	8.6	73	37	17.0	3.9	0	44.0	31.6	24.4	Franca
2Cyg3	24–42	23.2	100.3	8.2	72	28	28.6	3.4	0	44.8	26.4	28.8	Franco arcillosa
2Cyg4	42–90 90–106*	22.6	97.5	7.9	83	52	5.7	1.2	0	15.0	40.2	44.7	Arcillo limosa
3Cyg5	106–110*	17.5	82.0	7.7	71	36	4.4	1.0	0	16.1	38.2	45.7	Arcillosa
4Cyg6	110–115*	10.3	55.0	7.7	74	28	3.1	1.1	0	13.7	29.8	56.6	Arcillosa
6Cy2	148–160*	10.0	54.7	7.9	13	19	3.0	1.0	0	16.6	42.5	40.9	Arcillo limosa
7C	160–185*	12.2	73.1	n.d.	n.d.	16	4.3	0.7	0	16.5	44.8	38.7	Franco arcillo limosa
GA29 Gypsic Aquisalid													
Aygz	0–6/8	47.9	188.6	8.0	54	14	33.7	5.1	0	67.2	23.4	9.4	Franco arenosa
2Cyg1	6/8–24	19.8	99.3	8.4	71	28	24.8	4.4	0	54.2	18.9	26.9	Franco arcillo arenosa
3Cyg2	24– 80	15.5	79.6	8.1	68	41	27.7	1.4	0	29.0	22.9	48.0	Arcillosa
4Cyg3	80–110*	16.1	94.3	7.6	56	37	7.1	1.3	13	68.5	11.9	19.6	Franco arenosa
5Cg	110–140*	8.8	79.0	7.9	37	39	1.8	1.2	24	65.1	1.1	33.7	Franco arcillo arenosa
6Cg	140–170*	9.8	52.1	8.2	71	50	2.7	0.9	5	37.2	0.5	62.3	Arcillosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE	Yeso	MO	EG	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural USDA
						%	%	% vol		%	%		
GA33 Typic Aquisalid													
Az	0–21	3.9	27.2	8.0	45	35	2.7	1.4	15	70.9	20.2	9.0	Franco arenosa
Cz	21–28/39	3.1	38.6	8.2	27	32	<2	0.2	52	87.2	12.2	0.7	Arenosa
2Cz	28/39–54 Sup	4.5	51.1	8.2	26	32	<2	0.1	15	56.8	17.9	25.3	Franco arcillo arenosa
2Cz	28/39–54 Inf	5.9	44.7	8.2	36	48	2.4	0.2	6	50.2	7.2	42.6	Arcillo arenosa
3Cgkz	54–160	5.5	40.7	8.0	40	5	2.0	0.1	41	59.4	24.5	16.1	Franco arenosa
GA34 Typic Aquisalid													
Az	0–8/10	5.3	37.8	8.2	34	27	3.0	0.5	3	62.3	29.5	8.3	Franco arenosa
Cz	8/10–25/30	4.6	37.8	8.4	41	36	<2	0.3	6	49.0	34.0	17.0	Franca
2Cgkz	25/30–70	4.2	45.4	7.9	28	12	<2	0.1	41	70.8	18.4	10.8	Franco arenosa
3Cgz	70–117/120**	3.9	42.2	7.5	31	0	<2	0.1	2	67.2	25.3	7.5	Franco arenosa
3Cgz	70–117/120**	4.0	50.2	7.6	28	0	<2	0.1	3	85.5	13.1	1.5	Arenosa franca
3Cgz	70–117/120	4.6	44.7	7.6	35	0	<2	0.1	73	70.5	21.4	8.1	Franco arenosa
4Cz	117/120–135	5.1	59.7	7.5	26	0	<2	0.0	28	91.5	8.3	0.2	Arenosa
GA35 Typic Haploxerept													
Ap1 y Ap2	0–20	0.2	0.5	8.0	44	43	3.4	1.3	1	61.3	22.5	16.2	Franco arenosa
Bw1	20–37	0.2	0.4	8.5	55	43	3.4	0.7	0	45.8	30.2	24.0	Franca
Bw2	37–70	0.4	2.5	8.2	50	35	3.0	0.6	0	52.5	34.9	12.6	Franco arenosa
2Aby	70–100	1.4	10.4	8.1	47	25	2.4	0.4	1	50.4	35.7	13.9	Franca
2Cgy1	100–150	2.1	16.5	8.1	47	40	2.1	0.1	0	41.6	32.6	25.8	Franca
2Cgy2	150–210	2.9	22.6	7.9	46	33	2.4	0.1	1	40.8	39.3	19.9	Franca
n.d.	210–250*	4.5	24.1	7.8	42	25	16.0	0.1	0	65.1	26.7	8.3	Franco arenosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE %	Yeso %	MO	EG % vol	Arena %	Limo %	Arcilla	Clase Textural USDA
n.d.	250–270*	3.7	20.1	7.9	36	38	7.5	0.1	10	46.6	15.9	37.6	Arcillo arenosa
n.d.	270–290*	1.7	16.4	7.8	32	35	<2	0.1	21	55.1	20.6	24.3	Franco arcillo arenosa
n.d.	290–320*	1.9	15.0	7.8	30	38	<2	0.1	3	43.9	25.1	31.1	Franco arcillosa
n.d.	320–350*	3.3	15.0	7.5	42	39	3.1	0.1	9	52.3	23.7	24.0	Franco arcillo arenosa
GA36 Typic Calcixerept													
Ah	0–45	0.3	1.0	8.5	76	27	4	2.5	1	49.7	30.4	19.9	Franca
AB	45–57	0.5	2.7	8.7	47	50	2.2	0.4	0	35.3	37.3	27.4	Franco arcillosa
Bwgk	57–80	0.4	2.4	8.5	54	48	<2	0.3	0	26.6	37.1	36.3	Franco arcillosa
Ck	80–120	0.4	3.4	8.4	32	64	<2	0.1	2	76.0	11.5	12.5	Franco arenosa
GA37 Petrocalcic Calcixerept													
Ap	0–30	0.2	0.6	7.6	32	13	2.1	1.4	28	74.3	21.2	4.5	Franco arenosa
Bk	30–55/65	0.2	0.4	7.9	37	63	0.0	0.7	5	83.8	11.3	4.9	Arenosa franca
Bkm	55/65–75	0.2	0.6	7.9	30	69	0.0	0.4	40	79.9	10.5	9.5	Arenosa franca
GA38 Petrocalcic Calcixerept													
Ap	0–30	0.1	0.5	7.7	29	10	0.0	1.3	29	83.0	15.7	1.2	Arenosa franca
A2	30–35/50	0.2	0.4	8.0	37	27	0.0	0.9	32	74.7	17.7	7.6	Franco arenosa
Bkm	35/50–85/95	0.1	0.4	7.8	37	40	0.0	0.2	44	83.1	6.3	10.6	Arenosa franca
2Btk	85/95–170	0.2	0.6	7.7	35	22	3.3	0.1	45	54.7	35.2	10.1	Franco arenosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE %	Yeso %	MO %	EG % vol	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural USDA
GA39 Petrocalcic Calcixerept													
Ap	0–30	0.1	0.5	7.5	54	3	3.2	1.4	9	54.9	31.4	13.8	Franco arenosa
Ck	30–47/60	0.2	0.4	7.8	44	29	2.0	0.9	62	66.1	23.7	10.2	Franco arenosa
2Ck	47/60–120/130 Sup	0.1	0.7	8.0	42	51	0.0	0.4	71	89.4	9.7	0.9	Arenosa
2Ck	47/60–120/130 Inf	0.1	0.7	7.2	29	59	0.0	0.1	71	95.8	3.4	0.8	Arenosa
3C	120/130–170	0.1	0.7	7.8	26	13	0.0	0.0	65	84.4	14.6	1.0	Arenosa franca
GA40 Lithic Xerorthents													
A	0–11/25	0.2	0.7	7.6	49	16	3.1	4.7	11	73.7	20.4	5.9	Franco arenosa
GA41 Lithic Calcixerept													
A	0–25	0.2	1.0	7.6	45	33	0.0	2.0	9	68.8	21.2	9.9	Franco arenosa
Bwk	25–45	0.2	0.6	7.7	47	41	2.0	1.2	6	62.0	22.3	15.7	Franco arenosa
GA55 Typic Calcixerept													
A1	0–23	0.5	1.7	8.6	64	31	4.0	3.2	0	82.2	14.0	3.8	Arenosa franca
A2	23–40	0.4	1.7	8.5	45	30	1.9	1.1	5	71.5	22.4	6.1	Franco arenosa
2Bgk	40–75	0.3	0.9	8.2	48	51	1.6	0.6	0	64.9	13.7	21.4	Franco arcillo arenosa
3Bk	75–95/105	0.2	0.9	8.1	28	30	0.9	0.2	39	83.7	8.1	8.2	Arenosa franca
4C	95/105–118/127	0.1	0.2	8.3	34	2	0.8	0.1	35	85.5	13.6	0.9	Arenosa
5Cg	118/127–168	0.2	0.4	8.1	44	2	1.6	0.1	54	67.4	26.9	5.7	Franco arenosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE	Yeso	MO	EG	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural USDA
						%			% vol		%		
GA56 Typic Calcixerept													
A	0–35	0.1	0.8	8.0	41	24	2.2	1.5	1	64.7	25.3	10.0	Franco arenosa
2Bk1	35–85	1.6	11.8	8.1	40	38	1.4	0.5	0	50.4	27.1	22.4	Franco arcillo arenosa
2Bk2	85–100/105	0.3	2.1	8.2	36	51	1.1	0.2	0	44.1	23.0	32.8	Franco arcillosa
3C	100/105–110/117	0.2	1.2	8.2	30	17	0.9	0.1	15	85.0	11.9	3.1	Arenosa franca
4C1	110/117–135/145	0.2	1.1	8.2	41	7	1.4	0.1	34	67.9	25.8	6.4	Franco arenosa
4C2	135/145–170	0.3	n.d.	n.d.	n.d.	1	2.6	0.0	63	73.8	20.9	5.3	Franco arenosa
GA57 Sodic Calcixerept													
A	0–22	0.2	0.9	8.0	45	28	2.9	1.8	1	71.1	21.7	7.2	Franco arenosa
Cy	22–42	3.5	20.3	8.1	48	30	3.2	0.8	2	59.6	29.4	11.0	Franco arenosa
2Bgk	42–80	2.6	22.6	8.1	44	15	2	0.3	61	62.1	27.6	10.3	Franco arenosa
2C	80–110/120	2.6	19.1	7.9	48	8	1.8	0.3	63	72.2	21.1	6.7	Franco arenosa
3C	110/120–135**	2.7	25.2	7.9	39	1	1.3	0.1	4	70.7	24.4	4.9	Franco arenosa
4C	135–205	2.5	23.9	7.9	39	0	1.5	0.1	42	76.1	18.7	5.2	Arenosa franca
GA58 Calcic Aquisalid													
Az	0–4	9.5	70.7	8.0	43	23	9.3	1.6	14	56.3	32.7	11.0	Franco arenosa
2Bkz	4–43/48	4.7	37.6	8.2	51	23	2.5	0.5	42	62.3	22.1	15.6	Franco arenosa
3Ckz	43/48–85/97	5.8	41.5	7.9	57	0	2.5	0.2	58	63.6	29.4	7.0	Franco arenosa
4Cgz	85/97–105	5.1	38.7	7.6	55	0	2.1	0.2	6	55.9	35.0	9.1	Franco arenosa
5Cz	105–127	5.4	47.7	7.4	43	0	1.9	0.1	65	72.9	21.4	5.7	Franco arenosa
6Cz	127–180	5.8	53.1	7.2	37	0	1.9	0.1	62	85.5	13.3	1.2	Arenosa franca

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE %	Yeso %	MO	EG % vol	Arena %	Limo %	Arcilla	Clase Textural USDA
GA59 Typic Calcixerept													
A	0–20	1.0	5.0	7.6	77	42	3.7	3.6	0	37.7	40.8	21.5	Franca
Bwg	20–55	1.1	6.1	8.0	67	28	3.5	1.5	1	35.8	43.4	20.8	Franca
2Bgk	55–100/160	2.7	14.1	8.0	79	28	3.7	0.3	46	32.3	43.1	24.6	Franca
3Cg	100/160–190	2.5	15.1	7.8	65	3	3.0	0.1	50	37.3	44.4	18.3	Franca
GA61 Petrocalcic Palexeralf													
Ck	0–42/46	0.1	0.4	8.5	33	21	0.9	0.1	10	76.6	16.2	7.1	Franco arenosa
2Btk1	42/46–67/74	0.1	0.3	8.5	57	56	2.3	0.0	1	40.0	48.2	11.8	Franca
2Btk2	67/74–120	0.1	0.3	8.5	62	46	1.9	0.0	3	50.2	37.4	12.4	Franca
2Btkm3	120–155	0.1	0.3	8.3	81	4	3.2	0.0	1	45.9	36.8	17.3	Franca
GA62 Aquic Humixerepts													
Ap	0–28	0.3	1.4	8.4	51	41	4.3	2.7	1	32.7	44.0	23.3	Franca
A	28–43	0.5	2.9	8.2	58	42	3.7	2.4	2	35.2	39.5	25.3	Franca
Ckg1	43–65/69	0.7	5.5	8.2	40	69	1.4	0.7	15	44.9	2.1	53.1	Arcillosa
Ckg2	65/69–90/100	0.2	0.9	8.4	41	48	1.4	0.3	21	48.7	30.8	20.4	Franca
C	90/100–132	0.2	0.4	8.5	50	36	2.0	0.1	0	22.9	55.5	21.7	Franco limosa
GA63 Typic Calcixeroll													
Ap	0–30	0.1	0.4	8.3	36	20	2.0	1.7	28	67.1	26.7	6.3	Franco arenosa
Ak	30–45	0.2	0.4	8.4	44	27	1.7	1.1	31	68.1	24.1	7.9	Franco arenosa
Bk	45–75	0.1	0.6	8.4	28	30	0.8	0.2	50	87.5	10.2	2.3	Arenosa
Btk	75–81/89	0.1	0.5	8.5	26	15	0.4	0.0	27	96.5	2.5	1.0	Arenosa
2Bk	81/89–120	0.1	0.7	8.2	31	54	1.0	0.1	28	60.7	16.8	22.4	Franco arcillo arenosa

AIV-Tabla 1. Datos físico-químicos de los horizontes de suelo.

Horizonte	Profundidad cm	CE1:5 dS m ⁻¹	CEe	pHp	PS	CCE	Yeso	MO	EG	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural USDA
						%	%		% vol	%	%		
GA64 Petrocalcic Palexeroll													
Ap	0–33	0.2	0.5	8.0	37	7	1.9	1.5	33	74.6	21.2	4.3	Arenosa franca
Ak	33–33/43	0.2	0.4	8.4	41	25	1.6	1.1	26	74.4	19.2	6.4	Franco arenosa
Bkm	33–50/87	0.2	0.5	8.3	46	55	1.4	0.8	24	68.3	20.2	11.5	Franco arenosa
2Bk	43–82	0.2	0.9	8.2	39	65	0.9	0.3	18	67.1	16.8	16.1	Franco arenosa
GA65 Typic Calcixerept													
Ap	0–35	0.2	0.6	8.0	33	5	1.3	2.2	58	84.0	14.7	1.3	Arenosa franca
Bk	35–80	0.1	0.3	8.4	30	35	0.7	0.3	18	85.2	12.2	2.6	Arenosa franca
GA66 Typic Calcixeroll													
Ap	0–30	0.2	0.6	8.1	49	31	3.4	2.1	36	57.7	28.3	14.1	Franco arenosa
Bk	30–45/61	0.1	0.7	8.2	31	62	0.7	0.3	39	86.3	10.2	3.5	Arenosa franca
2Btssk1 y 2Btssk2	45/61–60/65 y 60/65–82	0.2	0.7	8.4	67	54	4.3	0.2	0	50.7	34.9	14.4	Franca
3Bssk	82–93	0.3	0.8	8.5	104	39	4.6	0.1	0	42.1	37.2	20.7	Franca
4Bssk	93–130	0.4	1.1	8.3	143	3	9.1	0.1	0	17.0	55.2	27.8	Franco arcillo limosa
GA67 Pachic Palexeroll													
Ap	0–50/60	0.2	n.d.	n.d.	n.d.	34	1.8	1.8	15	79.9	17.0	3.1	Arenosa franca
Bk	34/38–70/75	0.4	n.d.	n.d.	n.d.	88	0.9	0.6	34	82.1	10.3	7.6	Arenosa franca
Bkm	70/75–180	0.3	n.d.	n.d.	n.d.	71	1.5	0.4	19	78.4	14.7	6.9	Arenosa franca
GA68 Petrocalcic Calcixerept													
Ap	0–33	0.2	n.d.	n.d.	n.d.	11	1.3	1.2	25	72.5	23.2	4.3	Arenosa franca
3Ck2	93–103	0.2	n.d.	n.d.	n.d.	45	0.8	0.2	15	87.1	9.7	3.2	Arenosa franca
4Ck3	103–125	0.1	n.d.	n.d.	n.d.	33	0.8	0.1	4	81.9	14	4.1	Arenosa franca

